

Rauno Heikkilä, Mika Jaakkola

Johdatus tienrakentamisen automaatioon

Tiehallinnon selvityksiä 61/2004



Rauno Heikkilä, Mika Jaakkola

Johdatus tienrakentamisen automaatioon

Tiehallinnon selvityksiä 61/2004

Kannen kuvat: Matti Varis, Skanska-Asfaltti Oy

ISSN 1457-9871

ISBN 951-803-418-4

TIEH 3200915

Verkkojulkaisu pdf (www.tiehallinto.fi/julkaisut)

ISSN 1459-1553

ISBN 951-803-419-2

TIEH 3200915-v

Edita Prima Oy

Helsinki 2005

Julkaisua myy/saatavana:

asiakaspalvelu.prima@edita.fi

Faksi 020 450 2470

Puhelin 020 450 011



Painotuote

TIEHALLINTO
Opastinsilta 12 A
PL 33
00521 HELSINKI
Puhelinvaihde 0204 22 11

Rauno Heikkilä, Mika Jaakkola: Johdatus tienrakentamisen automaatioon.
Helsinki 2004. Tiehallinto. Tiehallinnon selvityksiä 61/2004. 69 s. ISSN 1457-9871,
ISBN 951-803-418-4, TIEH 3200915.

Asiasanat: Tienrakentaminen, automaatio ja mallintaminen
Aiheluokka: 41

TIIVISTELMÄ

Raportti johdattaa lukijansa tienrakentamiseen automaation maailmaan. Esitys perustuu Suomessa vuosina 2001-2004 toteutettuun Älykäs tietyömaa –tutkimuskokonaisuuteen ja sen eri hankkeiden tuloksiin.

Automaatio vaikuttaa kokonaisvaltaisesti tienrakentamisen kokonaistoimintaprosessiin. Uusia tekniikoita on sovellettavissa ja hyödynnettävissä läpi tienpidon toimintaprosessien lähtötietojen hankinnassa, tuotesuunnittelussa, työmaan ohjauksessa, toteutumalaadun tarkastuksessa sekä hoidossa ja ylläpidossa. Tulevaisuuden automatisoitu toimintaprosessi on digitaalinen, kolmiulotteinen, mallipohjainen, mekanisoitu ja automatisoitu. Se on myös mallinjalostusprosessi, jossa alussa luotua mallia jalostetaan ja hyödynnetään läpi toimintaprosessin.

Älykäs tietyömaa on pystynyt melko kattavasti tutkimaan, kehittämään ja kokeilemaan automaation kaikkia eri sektoreita ja osa-alueita tuottaen automaatioon liittyvää uutta tietoa, uutta osaamista, uusia tuotteita ja jopa uutta liiketoimintaa kaikille mukana olleille toimijoilleen. Havainnoidun ja syntyneen tiedon määrä on suuri ja raportti pystyy välittämään siitä vain osan. Pyrkimyksenä on hahmottaa tienrakennusautomaation kokonaiskuva ja sen mahdollisuuksia alan tulevaisuudelle.

Rauno Heikkilä, Mika Jaakkola: Introduktion till automationen inom vägbyggandet.
Helsingfors 2004. Vägförvaltningen. Vägförvaltningens utredningar. 69 s. ISSN 1457-9871,
ISBN 951-803-418-4, TIEH 3200915.

Ämnesord: Vägbyggandet, automaatio och modellering
Ämnesklass: 41

SAMMANFATTNING

Rapporten introducerar läsarna till vägbyggandet i den automatiserade världen. Framställningen baserar sig på undersökningshelheten En intelligent vägarbetsplats, som genomfördes i Finland 2001–2004, och på resultaten av olika projekt inom helheten.

Automationen inverkar övergripande på den totala verksamhetsprocessen inom vägbyggandet. Nya tekniker kan tillämpas och utnyttjas genom hela väghållningens verksamhetsprocess i fråga om anskaffning av utgångsuppgifter, produktplanering, arbetsplatsstyrning, utfallet av kvalitetskontrollen samt drift och underhåll. Den framtida automatiserade verksamhetsprocessen är digital, tredimensionell, modellbaserad, mekaniserad och automatiserad. Den är också en modellförädlingsprocess, där den modell som skapades i början förädlas och utnyttjas genom verksamhetsprocessen.

Den intelligenta vägarbetsplatsen har ganska heltäckande kunnat undersöka, utveckla och testa automationens alla olika sektorer och delområden genom att producera ny information, nytt kunnande och nya produkter samt till och med ny affärsverksamhet i anknytning till automationen till alla de aktörer som deltagit. Den observerade och uppkomna mängden information är stor och rapporten kan bara förmedla en del av den. Målet är att skissera upp en helhetsbild av vägbyggnadsautomatiken och dess möjligheter för branschens framtid.

Rauno Heikkilä, Mika Jaakkola: Introduction to Automated Road Construction.
Helsinki 2004. Finnish Road Administration. Finnra Reports 61/2004. 69 p.
ISSN 1457-9871, ISBN 951-803-418-4, TIEH 3200915.

Keywords: Road construction, automation and modelling
Subject Category: 41

SUMMARY

The report is an introduction to the world of the automation of road construction. It is based on the Intelligent Road Construction Site, collaborative R&D effort implemented in 2001–2004, as well as the results of its various projects.

Automation has a comprehensive impact on the overall road construction process. New technologies can be applied and utilised throughout the road management processes in the acquisition of source information, product design, site management, quality inspection as well as upkeep and maintenance. The automated process of the future will be digital, three-dimensional, model-based, mechanised and automated. It will also be a process of model refinement where the model created at the beginning will be refined and utilised throughout the process.

The Intelligent Road Construction Site has been able to research, develop and test all of the different sectors and areas of automation in quite a comprehensive manner, producing new automation-related information, expertise, products and even new business activities for all of the actors involved. A large amount of information has been observed and created, and only a part of it can be conveyed by the report. The report aims at providing an overall impression of the automation of road construction and the future opportunities it presents for the sector.

ESIPUHE

Rakentamisprosessien automatisointia ja sen edellyttämää tutkimus- ja kehitystyötä tehdään tällä hetkellä maailmanlaajuisesti. Tällaisessa laajassa infra-alaa koskevassa kehitystyössä ovat pisimmällä tällä hetkellä USA, Kanada ja Australia. Kehitysohjelmissa on pitkän aikavälin kunnianhimoisena ja haastavana tavoitteena uudistaa ja automatisoida infrarakentamisen prosessin kaikki eri vaiheet hankkeen suunnittelua varten tarvittavien tietojen keruusta itsestään raportoivaan ja korjaavaan rakenteeseen saakka.

Kokonaisvaltainen automaatio tarjoaa infrarakentamiseen kehittämismahdollisuuksia, joilla on mahdollista saavuttaa merkittävää taloudellista hyötyä sekä rakennustyön toimijoiden että koko yhteiskunnan mittakaavassa. Uuden Infra 2010 -ohjelman valmistelutyön yhteydessä arvioitiin, että suurimmat taloudelliset säästöt toimintaprosessien kehittämisessä olisi saavutettavissa juuri tilaus- ja tuotantoprosessien pitkälle viedyllä automatisoinilla.

Älykäs tietyömaa-tutkimusohjelma on yksi Teknologian kehittämiskeskuksen Tekesin vuonna 2001 käynnistämän viisivuotisen INFRA-teknologiaohjelman painopistealueista. Tutkimuskokonaisuus kattaa varsinaisen tienrakentamisen prosessin automatisoinnin. Tämän raportin tarkoituksena on hahmottaa tienrakentamisen automaation kokonaiskuva ja antaa yleiskuva tienrakentamisen automaation mahdollisuuksista alan tulevassa kehittämisessä.

Raportti perustuu niihin kokemuksiin, joita on saatu Älykäs tietyömaa tutkimuskokonaisuudesta ja sen eri kehityshankkeiden tuloksista. Tutkimuskokonaisuudessa on pystytty kehittämään ja kokeilemaan varsinaisen tienrakentamisprosessin eri sektoreiden ja osa-alueiden automatisointia.

Raportin ovat valmistelleet tekniikan tohtori Rauno Heikkilä ja diplomi-insinööri Mika Jaakkola Oulun yliopiston Rakentamisteknologian tutkimusyksiköstä. Tiehallinto on tukenut rahoituksellaan Älykäs tietyömaa -tutkimuskokonaisuudessa tienrakentamisen yleistä kehittämisosuutta ja tämä raportti johdatuksesta tienrakentamisen automaatioon julkaistaan Tiehallinnon julkaisusarjassa.

Helsingissä tammikuussa 2005

Tiehallinto
Hankinta

SISÄLTÖ

1	JOHDANTO	11
2	AUTOMAATIO LÄHTÖTIETOJEN HANKINNASSA	14
2.1	Maaston pintamallin mittaus ja mallinnus	14
2.2	Maaperämallin mittaus ja mallinnus	16
2.3	Vanhojen rakenteiden mittaus ja mallinnus	18
3	AUTOMAATIO TUOTESUUNNITTELUSSA	20
3.1	Geotekninen suunnittelu	20
3.2	Tiensuunnittelu	21
3.3	Kadunsuunnittelu	22
3.4	Sillansuunnittelu	25
4	AUTOMAATIO TYÖMAAN OHJAUKSESSA	28
4.1	Työntekijöiden ohjaus	28
4.2	Työkoneiden ohjaus	29
4.2.1	Kuorma-auto	29
4.2.2	Pyöräkuormain	30
4.2.3	Puskutraktori	31
4.2.4	Tiehöylä	32
4.2.5	Murskeenlevitin	37
4.2.6	Stabilointijyrsin	38
4.2.7	Kaivukone	40
4.2.8	Asfaltinlevitin	44
4.2.9	Tiivistyskone	50
4.2.10	Lyöntipaalutuskone	52
4.2.11	Kallioporaus koneet	54
4.3	Materiaalisiirtojen ohjaus	56
4.4	Aikataulun hallinta	57
4.5	Kustannusten ohjaus	58
4.6	Aliurakoitsijoiden hallinta	58
4.7	Laadun varmistus	58
5	AUTOMAATIO LAADUN TARKASTUKSESSA	61
6	AUTOMAATIO HOIDOSSA JA YLLÄPIDOSSA	65
7	ARVIOINTI JA YHTEENVETO	66
8	KIRJALLISUUSVIITTEET	67

1 JOHDANTO

Automaatio tulee kreikan kielestä ja tarkoittaa laitteiden tai koneiden liikkumista itsestään. Automaation kehityskaari on noin 40 vuotta pitkä. Ensimmäiset geometrisia ratoja jäykästi toistavat automaattit (1. robottigeneraatio) tulivat markkinoille 1960-luvun puolivälissä. Toisessa kehitysgeneraatiossa syntyivät *ohjelmoitavat* ja edelleen kolmannessa vaiheessa *aistivat* robotit. Parhaillaan automaatioalalla on jo menossa neljäs kehitysvaihe, jossa tutkimuskohteena ovat älykkäät, joustavat ja ihmisen kanssa vuorovaikutukseen kykenevät robotit.

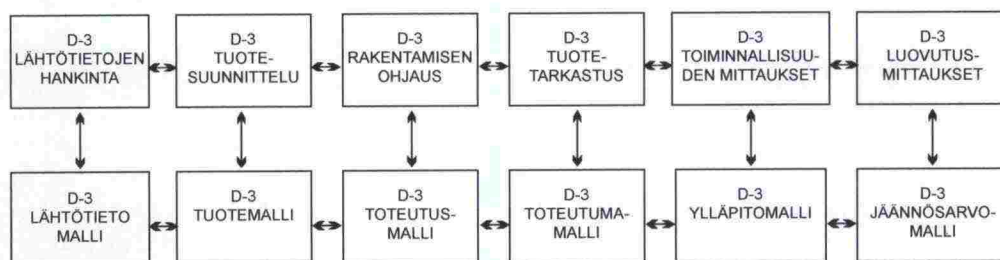
Informaatiotekniikka (IT) tarkoittaa informaation synnyttämiseen, käsittelyyn, jalostamiseen, siirtämiseen ja hyödyntämiseen tarvittavia menetelmiä ja tekniikoita. Määritelmänsä perusteella informaatiotekniikka tarjoaa rakentamisenkin käyttöön laajan valikoiman erilaisia mittaus-, ohjelmisto-, mallinnus-, tietoliikenne- ja ohjaustekniikoita. Automaatio on informaatiotekniikan yksi osa-alue, jolla alunperin ymmärrettiin suppeasti yksittäisten koneiden tai laitteiden liikkumista "älykkäästi" itsestään (automaattinen ohjaustekniikka, *hard robotics*). Nykyisin automaatiolla tarkoitetaan laajemmin toimintaprosessien integrointia entistä tehokkaampaan yhteistoimintaan informaatiotekniikan kokonaisvaltaisen soveltamisen avulla (*soft robotics*).

Talonrakennustyömaa ja keskeneräinen rakennus ovat automaattisesti ohjattavien koneiden näkökulmasta kompleksisia. Toistuvia samanlaisia työtehtäviä on vähän. Ihmistyötä tehdään paljon käyttäen käsityökalutyypillisesti erilaisia koneita ja laitteita. Kokonaan koneellistettuja työvaiheita on vähän. Erilaisten asennuskoneiden ohjaus kolmiulotteisesti on vaikeaa. Yhtenä perusongelmana on stabiiliin koordinaatistojärjestelmän hyödyntäminen työkoneiden ohjaukseen. Ihmisten suorituskky on riittävä useimpiin talonrakennustyömaan ohjaustehtäviin. Automaation avulla on kuitenkin saavutettavissa taloudellisia ja laadullisia hyötyjä myös talonrakennustyömaalla. Maanrakentamisen sovellusalue on automaatiolle edellistä potentiaalisempi. Työmaa on talonrakentamiseen nähden selkeämpi ja toistuvia samanlaisia työtehtäviä esiintyy paljon enemmän. Rakennustyö on myös pitkälle koneellistettua ja mekanisoitua. Kehittyneet 3D-paikkatietotekniikat mahdollistavat nykyisin myös tarkan liikkuvien työkoneiden ohjauksen. Ihmisen suorituskky ei yksistään riitä tarkkaan konetyön ohjaukseen.

Rakennustyömaalle robotit ja automaattit ovat tulleet muihin teollisuusaloihin verrattuna hitaasti. Aivan viime vuosina tilanne on kuitenkin oleellisesti muuttunut. Erityisesti maarakennuskoneisiin on kehitetty jo lukuisia erilaisia, tyypillisesti kuljettajia avustavia, automatisoituja koneohjausjärjestelmiä. Ensimmäisestä maarakennusautomaation kehitysgeneraatiosta voitaneen jo nyt katsoa osin siirtymäsi jo toiseen generaatioon. Tästä ovat merkinä ensimmäisten järjestelmien vanhanaikaisuus ja ominaisuuksien yksipuolisuus uutuuksiin verrattuna. Lisäksi yksittäisten koneiden anturoidin ja teränohjausjärjestelmien kehittämisestä ollaan nyt siirtymässä yhä enemmän kokonaistoimintaprosessin automatisoinnin suuntaan.

Rakentamisessa suunnittelun ja rakennustyömaan välisen tietoliikenteen kehittämisessä arvioidaan yleensäkin piilevän merkittävät kehittämispotentiaalit. Rakentamisen prosessissa suunnittelu saa lähtötietoja työmaa-alueelta tehdyistä mittauksista. Suunnittelun tuloksia käytetään suoraan ja välillisesti ohjaamaan

rakennustyötä. Rakentamisen lopputulokset mitataan ja tarkistetaan suunnitelmiin verraten. Kerättyä mittaus- ja suunnitelmätietoa hyödynnetään käytössä, ylläpidossa ja hoidossa tuotteiden elinkaaren ajan. Elinkaaren päättyessä tai tarpeiden muuttuessa prosessi alkaa alusta. Tietotekniikan ja automaation, kehittymisen myötä nämä perinteiset työvaiheet voidaan jo nykyisin suorittaa aikaisempaan nähden oleellisesti helpommin, tehokkaammin ja tarkemmin. Tulevaisuuden toimintaprosessi on digitaalinen, kolmiulotteisen geometriatiedon hallintaan sekä prosessissa geneerisesti jalostustuviin malleihin perustuva. Työnteko on mekanisoitu ja edelleen optimaaliselle tasolle automatisoitu.



Kuva 1. Yksinkertaistetut keskeiset tietovirrat tienpidon tulevaisuuden kokonaistoimintaprosessissa. 3-D (Three-dimensional) viittaa kokonaisvaltaisessa automaatiossa välttämättömään kolmiulotteiseen geometriatiedon hallintaan.

Yleisesti katsoen ja sopivasti yksinkertaistaen rakentamisprosessi (kuva 1) alkaa rakennuspaikalta tehtävillä lähtötietomittauksilla. Maa- ja talonrakentamisessa oleellisia lähtötietoja ovat maanpinnan muoto- ja korkeusvaihtelut sekä maaperäominaisuudet. Maanpinnan muodon mittaamisessa laserkeilaus lentokoneesta, helikopterista tai maanpinnalta on tienrakentamisessa syrjäyttämässä perinteisen fotogrammetrisen maastomallinnuksen. Laserkeilattu 3D-pistepilvi voidaan lukea karttakoordinaatistojärjestelmään sidottuna sisään analysointiohjelmaan, jonka avulla kyetään jo puoliautomaattisesti mallintamaan maanpinnan muotojen lisäksi esimerkiksi puustoa, tielinjoja ja rakennuksia. Maaperäominaisuuksien 3D-mallintaminen digitaalisesti käsiteltävään muotoon ei vielä ole kehittynyt pintamallinnuksen tasolle. Tutkimusaktiviteetteja on kuitenkin käynnissä.

Tuotesuunnittelu luo saaduista lähtötiedoista ja tavoitteista mallin ja ohjeen tuotteiden toteutukselle. Tuotteet ovat kolmiulotteisia, tyypillisesti suuria, kappaleita. Kun lähtötiedot saadaan kolmiulotteisina, voidaan myös suunnittelu tehdä nykyaikaisilla CAD-työkaluilla kolmiulotteisesti. Kolmiulotteisesta geometrisesta mallista voidaan tuottaa edelleen tarvittavat kuvannot tasopiirustuksia varten. Suunnittelun tehostumisen myötä oleellista on myös mahdollisuus hyödyntää suunnitelmamallia rakentamistyössä. Jos geometrinen malli on tarkka ja valmiiksi työmaan toimintakoordinaatistossa, voidaan sitä suoraan käyttää mittausten ja työkonien ohjaukseen. Tämä asettaa uusia vaatimuksia suunnittelun laadulle ja huolellisuudelle. Nykyisin myös reaaliaikainen yhteys CAD-ohjelman ja 3D-mittaustekniikoiden välillä on jo mahdollinen.

Työmaanohjaustehtävät jakaantuvat työntekijöiden, työkonien, materiaalien, aikataulun, kustannusten, alirakojen ja laadunvarmistuksen osatehtäviin. Informaatio- ja automaatiotekniikan avulla kaikkien osatehtävien hallintaa voidaan parantaa. Työntekijöiden ohjauksessa on oleellista, että kaikki työntekijät tietävät joka hetki mitä pitää tehdä. Lähes jokaiseen maarakentamisen työkonee-

seen ja työmenetelmään on markkinoilla saatavissa automatisoituja ohjausjärjestelmiä. Kehittyneimmissä järjestelmissä työstöterän ohjaus toimii automaattisesti 3D-paikannuksen ja 3D-mallien avulla. Järjestelmien toiminnalliset ominaisuudet vaihtelevat. Oleellista on, että automaattisilla ohjausjärjestelmillä on saavutettavissa merkittäviä laadullisia ja taloudellisia hyötyjä. Tietyömailla tehtyjen kokeiden ja havaintojen perusteella on todettu, että esimerkiksi neljän erilaisen työkoneen varusteluinvestointi 3D-ohjausjärjestelmillä maksaisi päälysrakennetöissä itsensä takaisin noin 20 km matkalla moottoritien rakennustyötä. Materiaalisiirroissa on tunnettava materiaaliavarastot, siirtotarpeet ja hetkelliset materiaalien siirtomäärät. Aikatauluhallintaan kiteytyvät työn toteutuksen useimmat kriittiset tekijät. Kustannusten reaaliaikainen hallinta ja optimointi mahdollistaa taloudellisten tavoitteiden saavuttamisen ja ylipäättään hankkeen toteutuksen. Suurten hankkeiden läpivienti edellyttää kokonaisvaltaista työn kaikkien työmaalla tehtävien töiden, mukaan lukien aliurakoitsijoiden tekemän työn, koordinointia. Työaikainen laadun seuranta ja varmistaminen luo perustan työn valmistumiselle ja mahdollistaa työn luovutuksen tilaajalle.

Laadun tarkastuksessa uutta tehokkuutta ja laatua tuottavaa teknologiaa edustavat erityisesti maanpinnalla toimivat 3D-laserkeilaimet. Nämä ovat mahdollistaneet rakennustöiden laadun tarkastamisen uudella tasolla. Esimerkiksi keskikokoisen sillan 3D-tarkastusmittauksen kesto on noin puoli miestyöpäivää. Tuloksena on 3D-pistepilvi, jota voidaan verrata 3D-suunnitelmamalliin ja laskea mitta-, muoto- ja sijaintipoikkeamat sekä edelleen verrata poikkeamia asetettuihin toleranssivaatimuksiin. Toleranssiylitykset voidaan havainnollistaa väreillä.

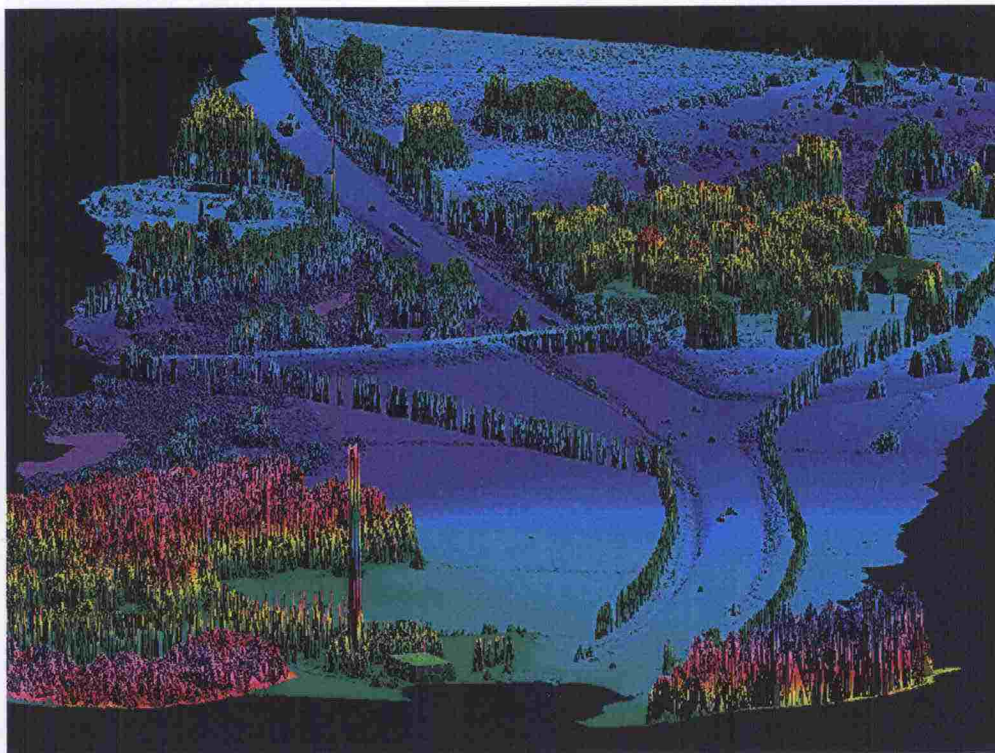
Valmistuneen tieväylän käytön, ylläpidon ja hoidon aikainen seuranta varmistaa liikennevirtojen turvallisen sujuvuuden ja tehokkuuden. Kerätty mittaustieto palvelee myös hoito- ja kunnossapitotöitä sekä edelleen on tallennettavissa tietorekistereihin tulevilla rakennusprojekteissa tarvittavaksi lähtötiedoiksi. Hoidon ja ylläpidon sisältävissä väylärakentamishankinnoissa lopputilanne voidaan mitata ja tallentaa jäännösarvomalliksi.

Informaatiotekniikka on parhaillaan merkittävällä tavalla uudistamassa rakennustyömaan toimintaa. Oleellista on digitaalinen 3D-toimintaprosessi: suunnittelu hyödyntää suoraan lähtötietojen mittauksia, suunnitelmamallia käytetään suoraan mittauksiin ja työkoneiden ohjauksiin sekä tarkastavien mittauksien tuloksia verrataan suoraan suunnitelmaan. Kun työstöterää ohjaa automatiikka, siirtyy vastuu ohjausmallin virheettömyydestä aikaisempaa enemmän suunnittelijalle. Teknologiakehitys alalla on edelleen nopeaa asettaen suuriakin haasteita käyttöönotolle ja hyödyntämiselle. Tämän vuoden järjestelmät saattavat ensi vuonna olla jo teknisesti vanhentuneita. Joka tapauksessa hallittu käyttöön edellyttää investointeja, toimijoiden yhteisiä pilottihankkeita ja mittavaa koulutusta. Suomessa rakentamisen informaatiotekniikan tutkimukseen ja kehittämiseen kohdennetut rahoitusohjelmat ovat mahdollistaneet tähän rakentamisen maailmanlaajuiseen "informaatiovallankumoukseen" osallistumisen. Päättäneille ohjelmille on tulossa myös seuraajia. Näiden panostusten avulla pystymme toivottavasti jatkossakin hyvin seuraamaan alan kansainvälistä kehitystä ja joillakin osa-alueilla toimimaan myös edelläkävijöinä ja esimerkkeinä.

2 AUTOMAATIO LÄHTÖTIETOJEN HANKINNASSA

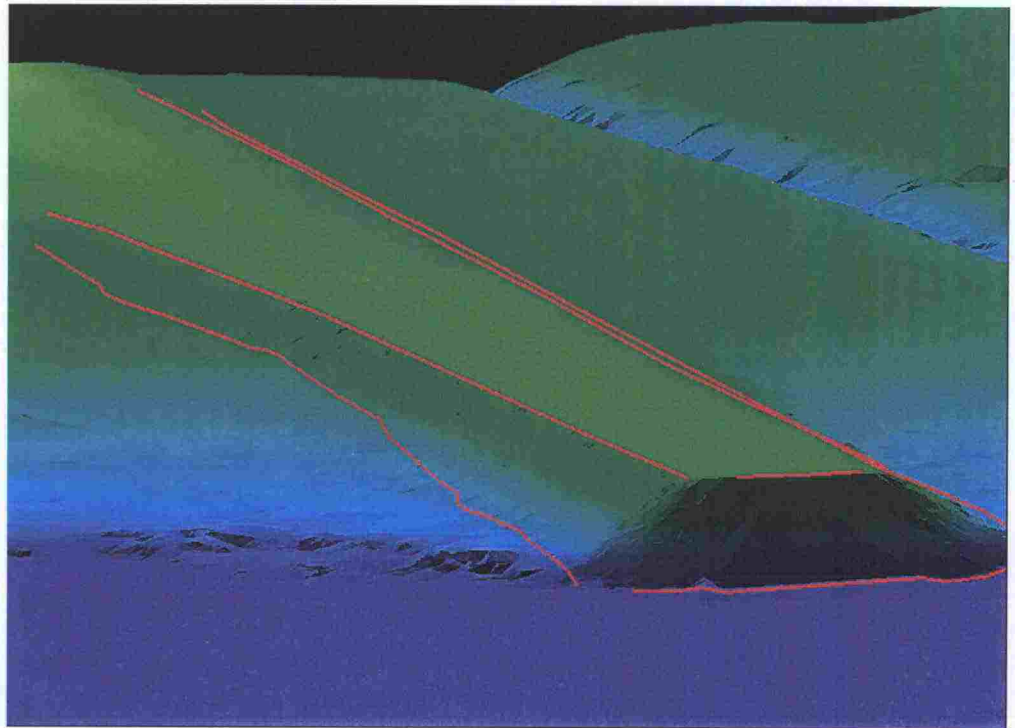
2.1 Maaston pintamallin mittaus ja mallinnus

Tieväylien suunnittelun lähtötiedoksi tarvitaan tiealueen maastomalli. Maastomallin mittaus voidaan tehdä fotogrammetrisella ilmakuvauksella, laserkeilaamalla lentokoneesta tai helikopterista, laserkeilaamalla liikkuvasta ajoneuvosta, paikallaan seisovalla laserkeilaimella tai pienehköissä kohteissa myös tarkalla GPS-järjestelmällä tai takymetrillä. Suurten alueiden mallinnuksen mittausmenetelmäksi soveltuu usein parhaiten ilmasta tehty laserkeilaus, joka on viime vuosina kehittynyt merkittävästi. Helikopterilla mittaus suoritetaan tyypillisesti 60-400 m lentokorkeudesta, jolla mitataan 40-280 m leveitä kaistaleita. Paras mitaustarkkuus saadaan lennettäessä matalalla (60-100 m). Lentokoneella mittaus suoritetaan tyypillisesti 500-800 m korkeudesta, jolla mitataan 250-550 m leveitä kaistaleita.



Kuva 2. Väreillä havainnollistettu ilmasta helikopterilla tehdyllä laserkeilauksella saatu maastomalli (Terrasolid Oy).

Laserkeilaus on periaatteeltaan tutkausta, jossa yhden mittauksen kaiku tulee osuma-alueelta, jonka halkaisija vaihtelee 10-50 cm lentokorkeudesta riippuen. Mittaustarkkuus riippii mittausetäisyydestä. Mittaustarkkuus erilaisiin materiaaleihin vaihtelee jonkun verran. Tarkkuus on yleensä paras avoimilla, tasaisilla pinnoilla. Tyypillisesti helikopterilla päästään noin 5 cm keskihajontaan ja lentokoneella noin 8 cm keskihajontaan. Tarkkuus on heikompi peitteisissä tai topografista muotovaihtelua sisältävissä kohteissa keskihajonnan vaihtelun ollessa tyypillisesti 5-25 cm.



Kuva 3. Taiteviivojen etsintä ja mallinnus pistepilvestä (Terrasolid Oy).



Kuva 4. Ilmalaserkeilausprosessin lopputulos: tarkka 3D-maastomalli. Mittauspistepilvestä on poimittu ja mallinnettu erikseen tien tasaus- ja reunaviivoja sekä luiskia, rakennuksia ja puita (Terrasolid Oy).

Laserkeilausprosessin lopputuloksia voivat olla maanpinta hajapisteinä, tienpinta taiteviivoina, geometrisesti oikaistu ortokuva, rakennukset yksinkertaisina 3D-malleina, puut 3D-soluina sekä muut erikseen mallinnetut kohteet kuten valopylväät, aidat ja liikennemerkit. Ohjelmistoissa mallinnuksen apuna käytetään erilaisia manuaalisia ja automaattisia rutiineja, joiden avulla eri kohteisiin osuneet pisteet voidaan tunnistaa ja luokitella. Mallintamisessa lähtötiedoksi voidaan

lukea esimerkiksi vanhan kartan tietoja. Taiteviivojen sovitukseen on kehitetty erilaisia automaattisia toimintoja. Rakennusten mallinnuksessa hyödynnetään toimintoja, jotka hakee tasomaisia kattopintoja pistepilvestä ja päättelevät reunojen muodot. Mallintaja voi tarkentaa reunojen muotoja kamerakuvia apuna käyttäen. Tuloksena saadaan rakennuksen yksinkertaistettu pintamalli, jossa talolla on seinät, katto ja räystäät. Mallin seinät ulottuvat hieman maanpinnan alapuolelle. Ohjelmarutiinit osaavat myös etsiä pistepilvestä puun muotoisia pisterykelmiä ja sijoittaa etukäteen mallinnetun 3D-puusolun kunkin puun kohdalle. (Terrasolid Oy).

Myös maasta tehtävien laserkeilausten sovellusmahdollisuudet ovat laajat. Tien tai kadun 3D-profiili voidaan mitata liikkuvaan ajoneuvoon asennetulla laserkeilaimella. Mittausautoa voidaan paikantaa työkoneiden ohjaukseen käytettyillä paikannusmenetelmillä (robottitakymetri, RTK-GPS). Mitattua pistepilveä ja siitä jalostettuja geometriamalleja voidaan käyttää rakenteen parantamisen lähtötietoina.

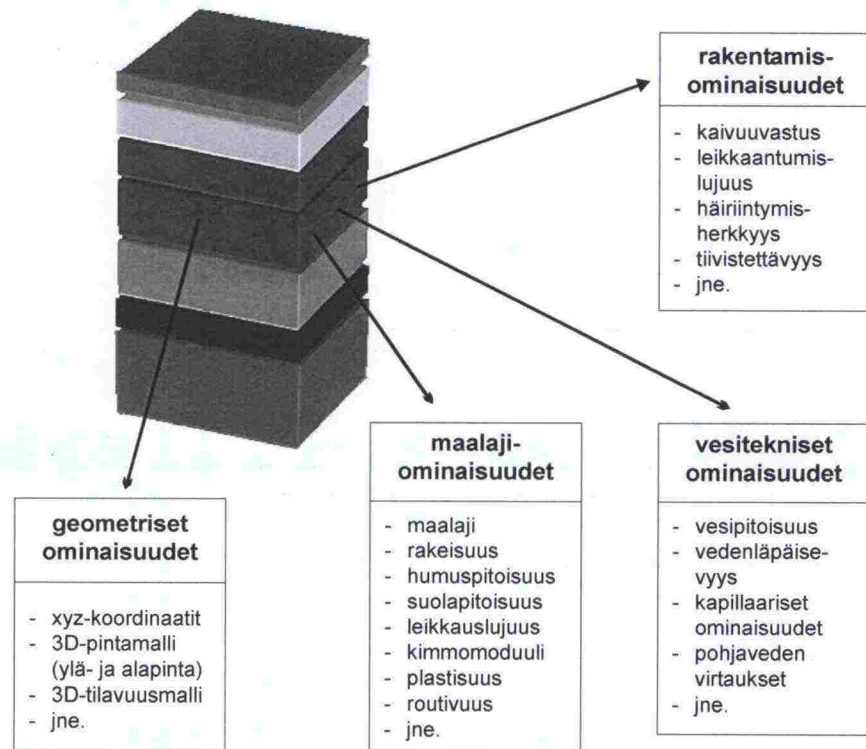


Kuva 5. Kokeessa tien 3D-profiilin mittausauto, jossa laserkeilainta paikannetaan robottitakymetrillä (AL-Engineering Oy, Oulun yliopisto).

2.2 Maaperämallin mittaus ja mallinnus

Myös pohjanvahvistamisen kokonaistoimintaprosessin kehittäminen ja automatisointi lähtee tähän saakka aika erillisten osavaiheiden integroimisesta nykyistä sujuvampaan yhteistoimintaan. Automatisoiduissa ja numeerisesti ohjatuissa teollisissa prosesseissa geometrianhallinta on yksi tärkeimmistä ja oleellisimmista perusilmiöistä. Sekä maa- että talonrakentamisessa geometriaa on viimekädessä aina välttämättä hallittava kolmiulotteisesti: toimintaympäristö ja samoin tuotteet ovat täysin kolmiulotteisia. Suuri mittakaava korostaa edelleen yhtenäiskoordinaatiston tarvetta. Jos automaattinen ohjaus halutaan tehdä mallipohjaisesti, on myös mallinnus suoritettava alusta lähtien kolmiulotteisesti. Kolmiulotteisesti paikannetut, hyvin monenlaisilla erilaisilla pohjatutkimustekniik-

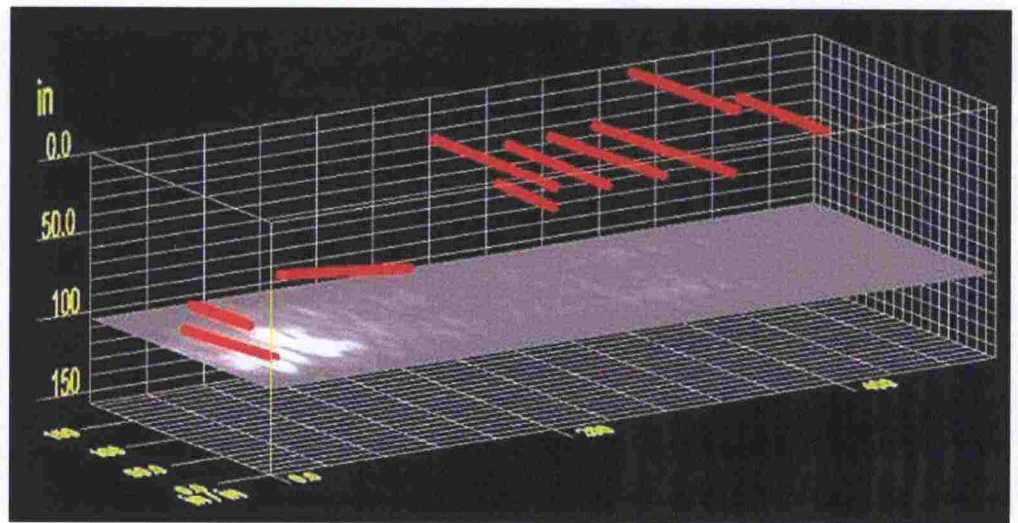
koilla ja -menetelmillä (seismiset, sähköseismiset, maatulkaus, näytteenotot, laboratoriokokeet, radiologiset mittausmenetelmät,...) mitatut, erilaiset pohjatutkimustiedot voitaisiin tulevaisuudessa yhdistää ja siirtää kolmiulotteiseen maaperämalliin. Tulevaisuuden maaperämalli sisältää tilavuusmallina tarvittavat tiedot mm. maanpinnan muodoista, maapohjan eri maalajikerroksista ja niiden ominaisuuksista (noudattaen esimerkiksi geoteknistä maalajiluokitusta ja maalajien kaivuuluokitusta), kerrosten rajapinnoista, pohjaveden käyttäytymistä kuvaavista eri pinnoista ja virtauksista, sekä muista geotekniikan ja pohjarakentamistyön kannalta tärkeistä ominaisuuksista. Maaperämallin tarkempi muodostamistapa on tutkimuksen keinoin tutkittava ja mallinnettava.



Kuva 6. Visio tulevaisuuden maaperämallin tietosisällöstä. Malli voisi sisältää suoraan myös työkoneiden ohjausjärjestelmissä hyödynnettäviä tietoja.

Myös pohjatutkimusten erilaiset havaintosuureet on tulevaisuuden automatisoidussa prosessissa kyettävä sijoittamaan kolmiulotteisesti maaperämalliin. Pääsääntöisesti kairaukset ja muut pohjatutkimustiedot paikannetaan nykyisin kaksikulotteisesti. Yhtenä ongelmana on erityyppisten suureiden mittaaminen kolmiulotteiseen maaperämalliin siten, että havaintotietoja voidaan tarkastella, analysoida ja hyödyntää vapaasti ja aidon kolmiulotteisesti. Myös useiden erityyppisten mittausten muodostama kokonaismittaustilanne olisi tarkemmin tutkittava ja mallinnettava.

Maatutka (GPR) on yksi mittaustekniikka, jolla voidaan havainnoida, löytää ja tutkia pinnanalaisia materiaaleja, kerroksia ja varusteita. Tutkimuksen ja menetelmäkehityksen edetessä materiaaleista ja rakenteista voidaan tuottaa yhä enemmän käyttökelpoisia ominaisuustietoja. Maatutkaa kokeillaan parhaillaan myös teräsbetonisiltojen ominaisuuksien tutkimiseen.



Kuva 9. Maatutkalla havaitut putket on mallinnettu 3D-CAD-ohjelmaan (Roadscanners Oy).



Kuva 10. Vanhojen rakenteiden tavoitteellinen malli (Helsinki).

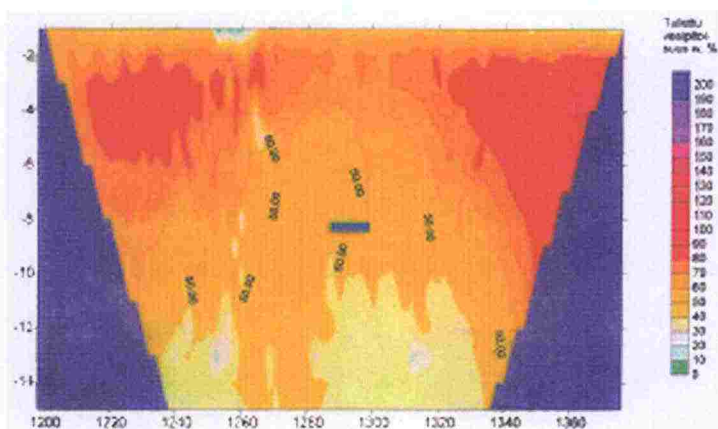
3 AUTOMAATIO TUOTESUUNNITTELUSSA

Tienrakentamisessa tuotesuunnittelu luo tiedot tuotteiden geometriasta (sijainti, mitat, muodot), rakenteista, laitteista ja materiaaleista ominaisuuksineen. Lisäksi tuotetaan tiedot maa-ainesten massamääristä, ominaisuuksista ja kustannuksista sekä valmistustekniikoiden vaatimuksista. Tuotesuunnittelua tarkastellaan geoteknisen suunnittelun, tiensuunnittelun, kadunsuunnittelun sekä sillansuunnittelun osalta.

3.1 Geotekninen suunnittelu

Automatisoidussa kokonaistoimintaprosessissa geoteknisen suunnittelun lähtötietoina ovat maaston 3D-pintamalli, geoteknisten maaperätutkimusten tiedot ja niistä jalostettu 3D-maaperämalli. Myös geotekninen suunnittelu ja mitoitus tehdään tulevaisuudessa yhä enemmän 3D-CAD-ympäristöissä, joista on edelleen yhteydet tarvittaviin laskenta- ja mitoitusohjelmistoihin, esimerkkeinä ovat painumalaskenta, liukupinta-analyysit ja FEM-laskenta.

Geoteknisessä suunnitteluvaiheessa geoteknikko mitoittaa kuormitusten mukaan tarvittavan pohjanvahvistuksen saamiensa lähtötietojen perusteella. Tuloksena on pohjanvahvistuksen kolmiulotteinen tuotemalli (tuoteosamalli). Tuotemallin syntyminen edellyttää suunnittelumenetelmien ja -työkalujen kehittämistä ja muuttamista aidosti kolmiulotteisen tiedonjalostusketjun mukaiseen logiikkaan. Geoteknisen tuotemallin toteuttava pohjanvahvistustyö tehdään erilaisilla työkoneilla (syvästabilointikone, massastabilointikone, lyöntipaalutus-kone, suihkupaalutuskone, kallioporakone), joiden numeeriseen ohjaamiseen tarvitaan lähtötiedoksi tuotemallista edelleen genereoitu koneohjausmalli. Tarvittavat liike- ja työstöradat eli koneohjausmallit ovat konetyypeittäin erilaisia. Automaattisessa ohjausmoodissa on kyettävä toisaalta generoimaan koneen ohjaukseen tarvittavia liikeratoja, toisaalta ohjaamaan konetta reaaliaikaisesti siten, että kuljettajalla säilyy edelleen tarvittavien avaintoimintojen hallinta. Usein koneen taloudellisiin ja järkeviin ohjausmoodiin on täysin manuaalisen ja täysin automaattisen välillä. Myös geotekninen suunnittelu on tulevaisuudessa integroitava nykyistä lähemmäksi työmaan toteutustekniikoita.



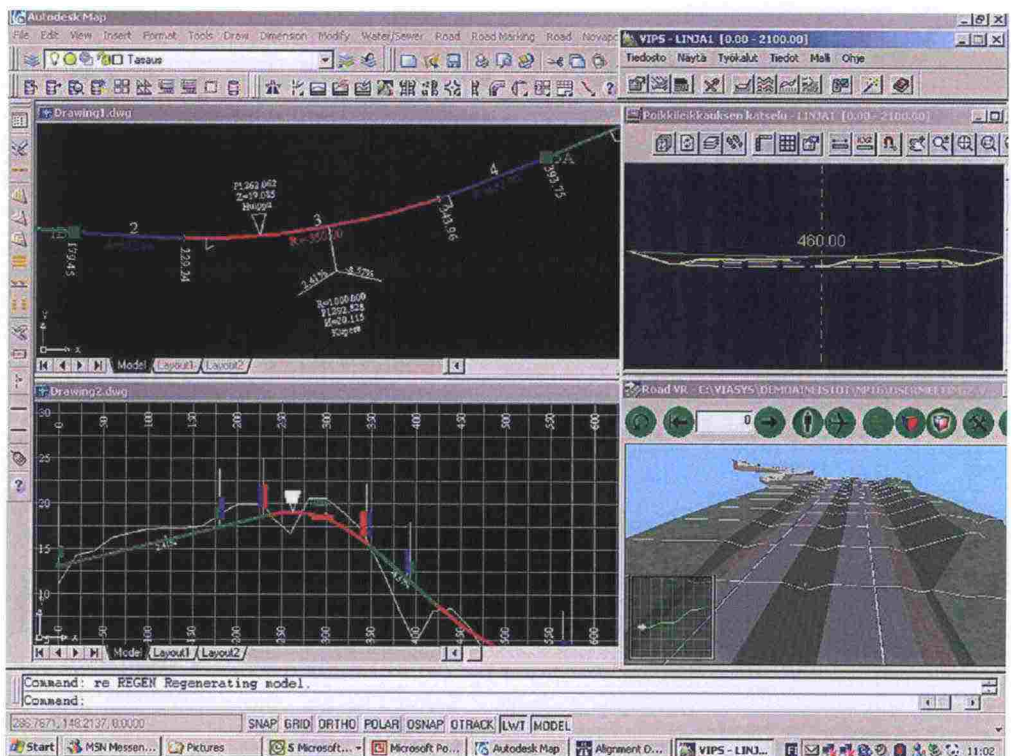
Kuva 11. Pohjamaan vesipitoisuuden muutokset on mahdollista mitata ja huomioida pohjarakentamisen työkoneiden ohjauksessa (VTT Rakennustekniikka).

3.2 Tiensuunnittelu

Digitaalinen maaston pinta- ja maaperämalli sekä vanhojen rakenteiden malli ovat tiensuunnittelun keskeisiä lähtötietoja. Tien suunnittelun ohessa ja osin rinnakkain etenevät myös geotekninen suunnittelu sekä erityisesti sillansuunnittelu. Vuorovaikutteisuus eri suunnittelutehtävien välillä lisääntynee edelleen.

Tienrakentamisen kokonaisprosessissa tien geometrian suunnittelu on luonnollisesti vain yksi tekninen osaprosessi. Sen merkitys on kuitenkin erittäin merkittävä sekä käytännön rakentamisen, kustannusten että lopputuotteen laadun kannalta. Tiegeometriasuunnittelun ratkaisut ja niiden toteuttamisen tarkkuus vaikuttavat monitahoisesti ja pitkävaikutteisesti esimerkiksi tienrakentamisen kokonaistaloudellisuuteen, tierakenteiden elinkaareen, tien käyttäjän ajomukavuuteen ja liikenneturvallisuuteen. Geometria on tienrakentamisessa myös tiedon järjestämisen ja hallinnan perusta.

Tien geometriasuunnittelu on teknologian mukana kehittyvä kokonaisuus. Tiedon jalostusprosessi lähtee maanpinnan muotojen ja maaperäominaisuuksien lähtötietojen hankinnasta ja jatkuu mittaustiedon tulkintana, mallinnuksena ja siirtona suunnittelujärjestelmille hyödynnettävään muotoon. Tiegeometrian suunnittelulogiikka on ollut pitkään muuttumaton perustuen tielinjauksen vaaka- ja pystygeometrian suunnitteluun ja jatkuen poikkileikkauksen sovituksena ja massojen laskentana. Kehittyvät tiensuunnitteluohjelmistot mahdollistavat suunnittelijalle eri vaihtoehtojen nopeamman ja tarkemman taloudellisen vertailun sekä suunnitelmien visualisoinnin.



Kuva 12. Nykyaikaisen 3D-tiensuunnitteluohjelman käyttöliittymä (Novapoint, Viasys Oy).

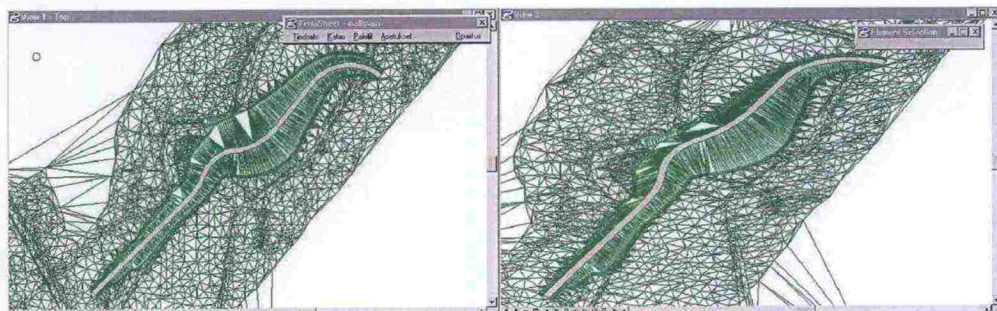
Suunnittelun tuloksena saatavat mallit sisältävät jo tällä hetkellä pääosan siitä tietosisällöstä, mitä mittausten suorittamiseen ja työkoneiden ohjaukseen tien päällysrakenteiden osalta tarvittaisiin. Useimpien suunnitteluohjelmien tuottamia malleja ei kuitenkaan voida vielä käyttää suoraan työkoneiden ohjauksessa. Nykyisin tiesuunnitelmista jalostetaan koneohjausjärjestelmiin tarvittavat koneohjausmallit erillisissä työmaan mittaus- ja koneohjaus-CAD-sovelluksissa.

Työkoneiden automatisoinnin lisääntyessä tarvitaan myös tiensuunnitteluohjelmiin uusia työkaluja, joilla mittausten sisältämä tieto ja suunnittelijan tekemät rakenteet muunnetaan työkoneiden toimilaitteiden ohjaukseen sopiviksi koneohjausmalleiksi. Jotta tähän osaamiseen päästäisiin myös käytännön tasolla, olisi suunnittelijoiden saatava lisää näkemystä käytännön työmenetelmistä ja toteutustavoista. Suunnitelmatiedon siirto suunnittelujärjestelmistä työmaalle on edelleen työläs vaihe, jonka helpottamiseksi tarvittaisiin yhteneviä toimintatapoja ja yhteisen tiedonsiirtoformaatin käyttöönottoa eri suunnittelu- ja mittausohjelmaversioissa. Tähän mennessä suunnittelujärjestelmien ja työkoneiden ohjausjärjestelmien kehittäjät keskittyvät vielä toimivien käytännön ratkaisujen kehittämiseen omiin suljettuihin järjestelmiinsä. Edistyksellisimmissä järjestelmissä on esimerkiksi XML-pohjainen ja avoimempi suunnitelmatiedon siirto jo mahdollista.

Tiensuunnittelijoilta saadun palautteen mukaan tiesuunnitteluohjelmien suurimmat puutteet liittyvät tien poikkileikkausten ja rakenteen maastoon sovittamisen työkaluihin. Tästä johtuen esimerkiksi tien vaihtoehtoisten linjausten massojen laskenta ja kustannusten vertailu on vielä useimmissa ohjelmissa melko työlästä. Tien päällysrakenteiden rakentamisessa koneohjausmallien tuottaminen tavallisimmilla koneiden on pääpiirteittäin toteutettu nyt käytössä olevissa ohjelmistotyökaluissa. Samojen rakenneosien toteuttamiseen käytettävissä eri konetyypeissä voidaan pitkälti hyödyntää samantyyppisiä koneohjausmalleja. Päällysrakenteiden pintamalleja voidaan käyttää tiehöylien, levittimien ja kaivukoneiden ohjausjärjestelmissä. Sen sijaan esimerkiksi pohjarakentamisen työkoneiden koneohjausmallien kehittämiseksi tarvittaisiin vielä kehittyneempiä sekä mallinnusmenetelmiä että malleja.

3.3 Kadunsuunnittelu

Kadunsuunnittelu on tiensuunnittelun erikoistapaus, jossa väylän pituus on lyhyempi ja sitä ympäröi kaupunki-infrastruktuuri maaperän päällä ja alla olevilla rakenteilla. Katuverkon rakentaminen, hoito ja ylläpito on laaja tehtäväkokonaisuus, jonka tehtävänä tuottaa toimiva katuverkko yhteiskunnan tarpeisiin. Kadunsuunnittelu on kunnallistekniikan ja yleisten teiden suunnittelua.



Kuva 13. Kadun 3D-geometrialinjojen perusteella mallinnetut luiskat ja niiden kolmioverkko.

Katusuunnittelija aloittaa katusuunnittelun kokoamalla, yhdistämällä ja muuntamalla katualueen olemassa olevat tiedot kuten vanhat maastomallit, kartat, ortokuvat ja muut suunnittelukohteen lähtötiedot (kantakartta, kaavatiedot, omistajatiedot, geotekniset tiedot, johdot ja kaapelit, tunnelit, kiinteistöt) käyttökelpoiseen muotoon. Puuttuvista tai epävarmoista lähtötiedoista tehdään täydennysmittaussuunnitelma. Osa mittaustiedoista saadaan valmiiksi tulkittuna ja esimerkiksi pohjatutkimusten mallintaminen on yleensä mittauksista vastaavan geotekniikan asiantuntijan vastuulla. Osan lähtötiedoista katusuunnittelija mallintaa ja samalla pyrkii arvioimaan tietojen tarkkuutta ja luotettavuutta.



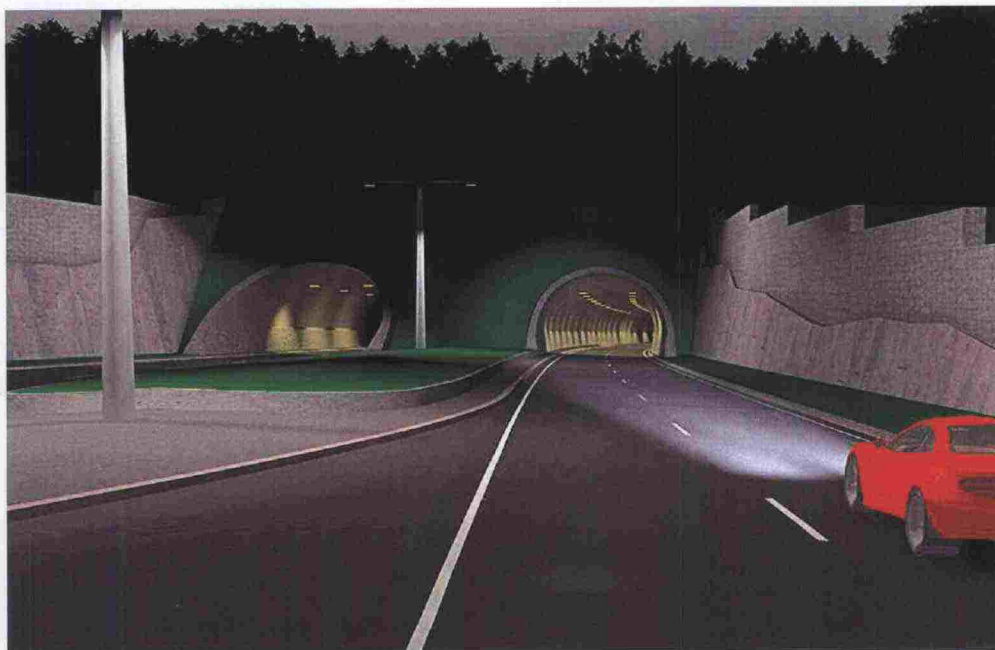
Kuva 14. Kolmiulotteiseen katumalliin on virtuaalisesti vaihdettu vanhan sillan paikalle uusi siltamalli (Inkoon kirkkosilta, Finnmap Infra Oy).

Kadun linjaus, reunakivilinjat ja poikkileikkaukset suunnitellaan kohteen maastomallia hyödyntäen. Suunnitelmissa esitetään kadun vaakageometria, tasaus, katutilan käyttö, johtojen rakenneratkaisut ja erikoisrakenteet. Käytännössä katu- luokka ja erilaiset pakkopisteet, kuten vanhat reunakivilinjat ja rakennukset, määräävät pitkälle kadun linjauksen ja poikkileikkauksen. Erityistä huomiota kiinnitetään kuivatussuunnitteluun. Suunnitelmat esitetään sekä 2D- että 3D-linjoina ja 3D-pintoina. Esimerkiksi viemäröinnin suunnitelmat tehdään yleensä 3D-ympäristössä, jolloin voidaan huomioida pakkopisteet ja optimoida mahdolliset kalliolouhinnat. Toisaalta kiinteistörajat sekä sähkö- ja tietoliikennekaapelit tyypillisesti kuvataan 2D-tietoina.

Rakennussuunnitteluvaiheessa mallinnetaan reunakivilinjat 3D-linjoiksi. Kadun päällysrakenteen rakennekerrokset ja päällysrakenteen alapinnan ja johtokai- vantojen esittäminen 3D-linjoina on harvoin käytännössä resurssien vuoksi mah- dollista. Rakennussuunnitteluvaiheen tuloksena työmaan käyttöön saadaan katurakenteiden rakennussuunnitelmat, joita mittaaajat edelleen käyttävät työ- maan mittauksissa lähtötietoina. Mittaustiedostojen valmistelu mittaryhmille on yleensä oma työvaiheensa, jossa suunnitelmatiedoista poimitaan oleelliset mit- taustiedot ja muunnetaan ne kullekin mittalaitteille sopivaan formaattiin.

Kadun suunnittelun lähtötietoina on perinteisesti käytetty fotogrammetrisia ilma-kuva-aineistoja, joista jalostettuja malli- ja kuva-aineistoja on täydennetty takymetri- ja GPS-mittauksin. Työmaan merkintämittauksissa käytetään pääasiallisena mittaustekniikkana servo- tai robottitakymetrejä, joissa lähtötietoina on katusuunnitelma-aineistosta jalostettua digitaalista piste-, linja- ja pintamallitietoa. Myös RTK/GPS-mittaustekniikan käytettävyyden on viime vuosina kehittänyt nopeasti ja laitteet ovat jo yleisesti käytössä kadunrakentamisen mittaustehtävissä. GPS-teknologialla on rajoituksena rakenteiden aiheuttamat katveet sekä muuttuvan satelliittigeometrian vaikutus mittaustarkkuuteen. Uusimmissa järjestelmissä on graafinen mittaustulosten näyttö ja langaton yhteys käyttöjärjestelmätietokoneen ja paikannuslaitteyksikön välillä.

Uutena ja nopeasti kehittyvänä mallinnus- ja mittausmenetelmänä on tulossa laserkeilauksen tuottama digitaalinen pisteaineisto ja kuva-aineisto sekä näistä tulostettu malliaineisto. Laserkeilaus on nopea keino laadukkaan korkeusmallin tekoon. Maasta tehtävää laserkeilausta on käytössä jo laajasti rakennusten julkisivujen ja teollisuuslaitosten mallinnuksessa. Infra-alalla laserkeilausta sovelletaan ensimmäisenä siltojen mallinnukseen.



Kuva 15. Microstation ja Terra-ohjelmilla tuotettu visualisointimalli Helsingin Vuosaaren katusuunnitelmasta (Finnmap Infra Oy).

Katusuunnittelijoilta saadun palautteen mukaan 3D-suunnitteluohjelmistoihin tarvittaisiin nykyistä parempaa käytettävyyttä ja uusia työkaluja esimerkiksi eri linjausvaihtoehtojen vertailuun. Yleensäkin ohjelmistoihin tarvittaisiin helppokäyttöisempiä työkaluja ennen kuin 3D-suunnittelua voidaan täysin hyödyntää. Toisaalta ymmärretään 3D-suunnittelun selvät hyödyt aikaisempaan 2D-suunnitteluun verrattuna. Kadun rakennemassojen ja materiaalmäärien sekä edelleen kustannusten laskenta 3D-suunnitelmiin perustuen mahdollistaisi eri toteutusvaihtoehtojen vertailun ja tarkempien kustannusarvioiden laadinnan.

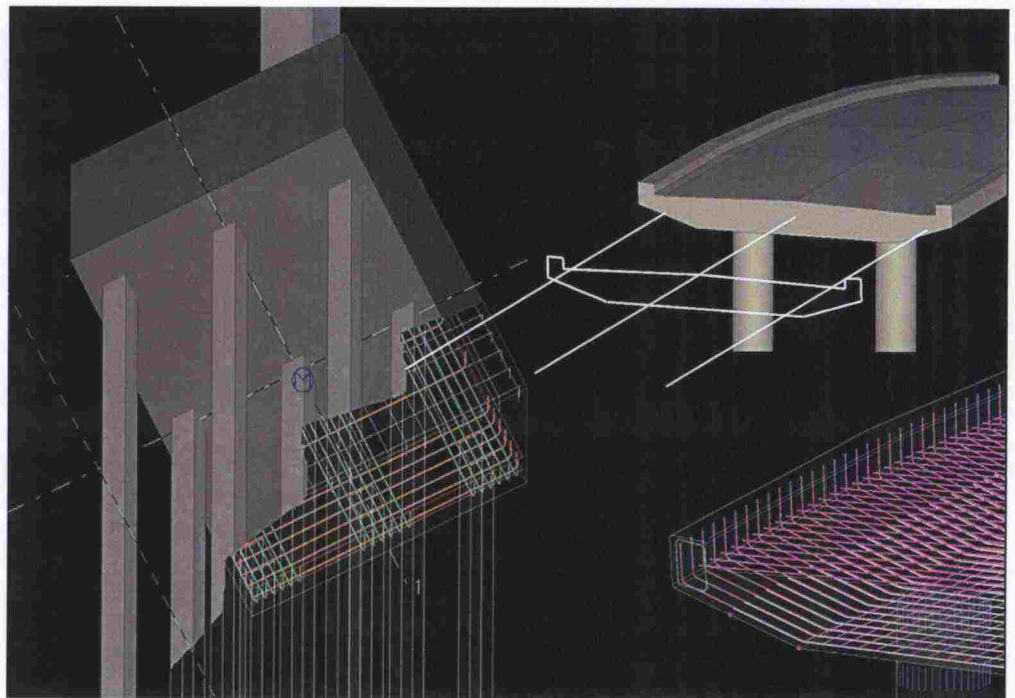
Katutyömaan tuotannon ohjausta tulisi kehittää siten, että digitaalista suunnitelmatietoa voitaisiin käyttää tuotannossa nykyistä laajemmin. Kadun

3D-suunnitelmia olisi mahdollista hyödyntää suoraan ohjaamaan työmaan mitauksia ja työkoneita. Automaattisesti ohjattuja maanrakennuskoneita voitaisiin kadunrakentamisessa käyttää esimerkiksi asfaltin tarkkuusjyrsinnässä, kevyen liikenteen kantavien kerrosten rakentamisessa tai pohjamaan stabiloinnissa.

Nykyinen rakennuslaki antaa asukkaille myös kadunrakentamisen suhteen runsaasti vaikutusvaltaa ja edellyttää ratkaisujen havainnollistamista päätöksenteon helpottamiseksi. Asiakaslähtöisesti ajateltuna katu ja myös sen suunnittelu tehdään asukkaille. Käytännössä katusuunnitelmia voitaisiin esitellä asukkaille yhä enemmän esimerkiksi internetin välityksellä. Suunnitelmien havainnollisuus on ensiarvoisen tärkeää. Katusuunnitteluohjelmistoihin tarvitaan työkaluja, joilla rakennemalleista voidaan tuottaa havainnollisia virtuaalimalleja.

3.4 Sillansuunnittelu

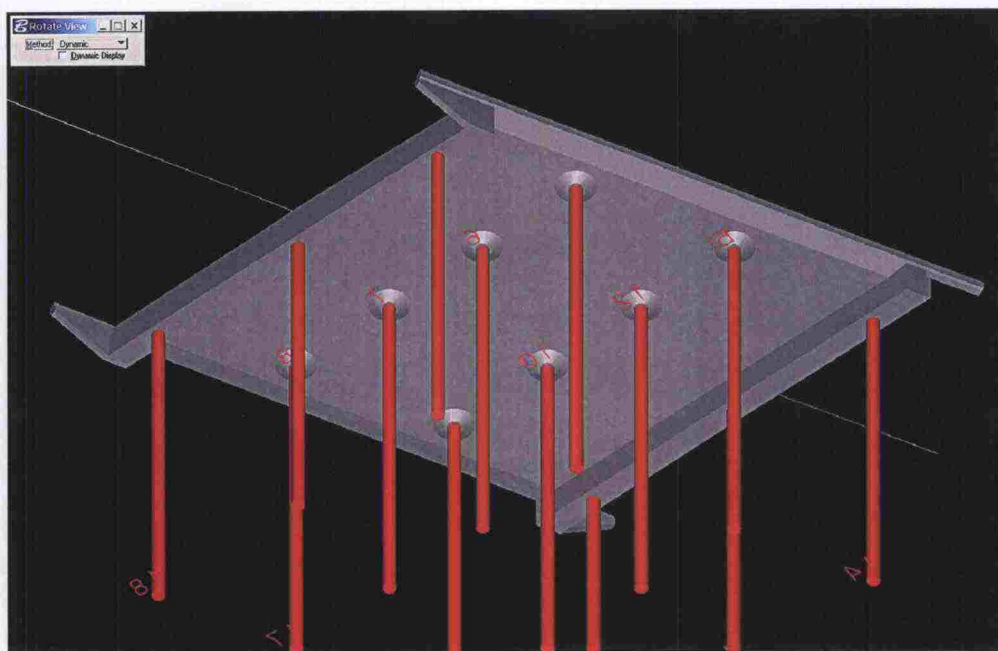
Sillansuunnittelu kytkeytyy yhdeksi osaksi tieväylien suunnittelua ja rakentamista. Tähän saakka teräsbetonisiltojen suunnittelu on Suomessakin tehty 2D-piirtämiseen perustuvilla CAD-ohjelmistoilla. Tässä kokonaisuudessa tietojen siirtämisessä ja jalostamisesta osavaiheesta toiseen esiintyy vielä nykyisin ongelmia, tietokatkoksia ja osaamattomuutta. Tarvittavia tiegeometriatietoja ei vielä yleisesti osata siirtää toimintaprosessin osavaiheesta toiseen. Siirtyminen 3D-mallintamiseen vaikuttaa sillansuunnittelussa hyvin perustelluksi. Hyötyjä arvioidaan saavutettavan jo pelkästään sillansuunnittelussa. Sillansuunnitteluun on kehitetty uusia pursotustyyppisiä mallinnustyökaluja teräsbetonisiltojen tyyppisten eri rakenneosien mallintamiseen. 3D-geometriamallin täydentynee tulevaisuudessa yhä enemmän tuotemallityyppiseksi geometriatiedon lisäksi myös muuta tietoa sisältäväksi malliksi.



Kuva 16. Teräsbetonisiltojen suunnittelutyökalut ovat kehittymässä 3D-tuotemallinnuspohjaisiksi. Lähitulevaisuudessa myös raudoitteet mallinnetaan kolmiulotteisesti.

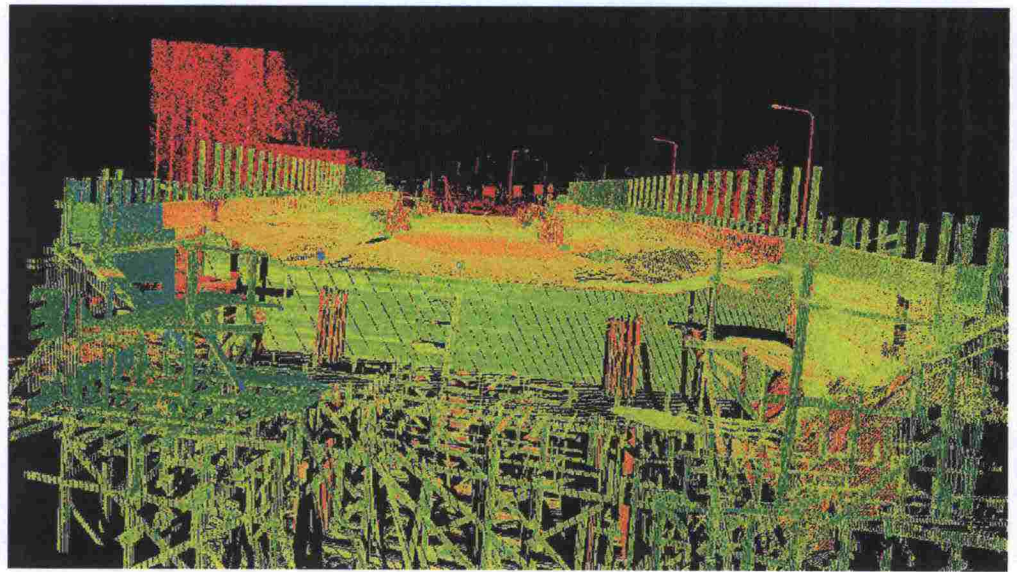
Silta-alalla geometriatiedon hallinta luo perustan ja rungon siltojen suunnittelun ja rakentamisen onnistumiselle. Sillan kansi- ja päällysrakenteet on suunniteltava tarkasti tiegeometrian mukaisesti ja siihen liittyväksi yhdeksi osaksi. Siltaan tarvittavat alusrakenteet riippuvat oleellisesti siltapaikan maastogeometriasta sekä maaperän ominaisuuksista. Dimensioiltaan silta on yleensä niin suuri, että rakennustyöt on välttämättä tehtävä pidemmällä aikavälillä vaiheittain jaksoteltuna. Tällöin yhden yhtenäisen ja tarkan toimintakoordinaatiston perustaminen, ylläpito ja siinä työskentely on ainoa mahdollisuus rakennustöiden läpivientiin. Kokonaisuutena geometriatiedon tarkka hallitseminen läpi kokonaistointaprosessin, eli varhaisista lähtötietojen mittauksista suunnitteluun, jossa lähtötiedoista jalostetaan mahdollisimman tarkasti optimaalinen tuotegeometria, josta edelleen poimitaan tai jalostetaan työmaan eri mittauksiin tarvittavat ohjaustiedot sekä johon verrataan mitattuja toteutumätietoja, on sillan suunnittelun ja rakentamisen keskeisimpiä ellei kaikkein keskeisin avaintehtävä. Täten siltojen geometrianhallinnan tehostamisen ja parantamisen kehittämispanokset kohdentuvat toimintaprosessin kehittämisen merkittävimpään ja tärkeimpään ytimeen.

Oleellista on suora tiedonsiirtoyhteys työmaan mittaussuunnitteluun ja mittauksiin. Sillan 3D-mallista voidaan poimia paikalleenmittauksiin ja laaduntarkastusmittauksiin kulloinkin tarvittavaa geometriatietoa ilman erillistä koordinaattien laskentaa. Myös reaaliaikainen CAD/CAM-tyyppinen työskentely on ainakin periaatteessa mahdollista. Tällöin takymetrillä mitatut koordinaatit näkyvät CAD-mallissa välittömästi mittauksen jälkeen. CAD-mallista voidaan myös ohjata takymetrin mittaustoimintoja esimerkiksi pisteen paikalleenmittauksessa. Graafinen CAD-käyttöliittymä vaikuttaa myös hyvin soveltuvan mittausteknikkojen mittaussuunnittelutyökaluksi. Koulutusta hallittuun käyttöönottoon ja virheettöömään käyttämiseen kuitenkin varmasti tarvitaan.



Kuva 17. Sillan mitta- ja sijaintitarkka 3D-tuotemalli. Mallia voidaan suoraan hyödyntää valmiin sillan tarkastusmittauksessa poikkeamien laskentaan. Paikalleenmittauksia varten mallista voidaan kätevästi tuottaa ns. esikohotusmalli, joka tarvitaan muottien rakentamiseen (SuunnitteluKORTES Oy).

Työmaalla nykyaikaisilla 3D-mittaustekniikoilla eli lähinnä robottitakymetrilla ja laserkeilaimella pystytään suoraan hyödyntämään suunnittelijan tekemään sillan 3D-geometriamallia. Tyypillisesti paikalleenmittaukset suoritetaan takymetrilla. Pistepilviä mittaavat laserkeilaimet vaikuttavat soveltuvan muottien ja siltojen tarkastusmittauksiin erinomaisesti. Kehitetyillä uusilla työkaluilla voidaan suoraan ja havainnollisesti tarkastella muoteissa ja valmiissa silloissa olevia sijainti-, mitta- ja muotopoikkeamia kolmiulotteisesti. Poikkeamia voidaan havainnollistaa poikkeamien suuruuden mukaan värjäämällä. Jatkotutkimuksen ja -kehityksen tehtäväksi jää kolmiulotteiseen toimintamalliin paremmin sopivan toleranssijärjestelmän uudistaminen.



Kuva 18. Laserkeilaamalla tarkistettu sillan muotti (Leica Nilomark Oy).

4 AUTOMAATIO TYÖMAAN OHJAUKSESSA

4.1 Työntekijöiden ohjaus

Automaatiota voidaan hyödyntää monin eri tavoin työntekijöiden ohjauksessa. Rakennustyömaalla on oleellista, että kaikki tietävät joka hetki mitä tekevät. Työohjeet tulisi saada yksilöille ja ryhmille soveltuvia tekniikoita käyttäen mahdollisimman reaaliaikaisesti. Työntekijöillä voisi olla päätelaitteita (älypuhelimia), joilla esimerkiksi suunnitelman sisällön pystyisi tarkistamaan nopeasti ja vaivattomasti. Samoin työntekijät voisivat tallentaa yksittäisiä laatuhavaintoja työmaan tietojärjestelmään. Paikalleenmittauksilla luodaan rakennustyön erivaiheissa tarvittavat geometriset ohjaustiedot. Työmaan paikalleenmittauksiin soveltuvat nykyisin parhaiten robottitakymetrit. Tarvittavat ohjauspisteet sekä niiden koordinaatit voidaan poimia tai generoida rakennustyön 3D-toteutusmallista.



Kuva 19. Jokaisen työntekijän tulisi tietää koko ajan työtehtävänsä ja saada tarvittaessa nopeasti niiden täsmälliseen suorittamiseen tarvittavat ohjeet (Oulu).

Langattomia tiedonsiirtotekniikoita voidaan tietyömaalla soveltaa esimerkiksi toimintojen seurantaan, toteutumien tallentamiseen, työnsuunnitteluun ja eri tehtävien reaaliaikaiseen ohjaukseen. Yhteydet liikkuviin työkoneisiin voidaan toteuttaa esimerkiksi GPRS- tai GSM-tekniikoilla ajoneuvopäätteille, kuten kännykkä (halpa, tuttu kuljettajille, kulkee hyvin mukana) tai ajoneuvotietokone (kalliimpi, graafinen käyttöliittymä, käyttö vaatii enemmän opettelua). Langattomassa järjestelmässä tarvittavia ja hyödyllisiä erilaisia toimintoja voisivat olla työntekijän ilmoittautuminen, lastattavan auton tunnistus ja valinta, karttapohjaisen paikannuksen hyödyntäminen opastuksessa ja matkanmittauksessa sekä autojen ajojen optimointi. Käytössä tietokanta keräisi päätelaitteiden lähettämät viestit, jolloin työmaamestari voi seurata kertymää eli suunnitellun työn toteutumaa.

4.2 Työkoneiden ohjaus

Työkoneiden ohjausjärjestelmät ovat maailmassa nopeasti kehittymässä ja lisääntymässä. Nykyiset työkoneiden ohjausjärjestelmät koostuvat tyypillisesti erillisestä työstöterän asentoa ja sijaintia osoittavasta perusjärjestelmästä ja sen päälle erikseen asennetusta paikkatietoa ja 3D-mallia hyödyntävästä järjestelmästä. 3D-sovellus tuottaa poikkeamatietoa, jota välitetään tietoliikenneportin kautta terän kallistusautomaatikalle tai kuljettajaa ohjaavalle järjestelmälle. Perusjärjestelmät sisältävät yleensä aina myös tasolaser-ohjauksen, jota voidaan käyttää kohteissa, joissa ei ole 3D-suunnitelmaa käytettävissä.

Kehittyneemmissä järjestelmissä eri toiminnot ja ohjelmistot on integroitu samaan ajoneuvotietokoneeseen. Samoin tietoliikenneyhteydet ohjausyksikön, asentoantureiden ja ohjaimien välillä on toteutettu digitaalisena tiedonsiirtona tyypillisesti CAN-väylää hyödyntäen. Eri konetyyppien toimintojen automatisointiin tarvitaan eri tasoisia ohjausjärjestelmiä myös työmenetelmästä ja sen tarkkuusvaatimuksista riippuen.

4.2.1 Kuorma-auto

Tienrakennustyömaan yleisimpiä kuljetusvälineitä Suomessa ovat raskaat 4-akseliset kuorma-autot. Hyvissä olosuhteissa ja pitkillä kuljetusmatkoilla käytetään lisäksi täysperävaunuja. Kuljetusmatkat ja myös kuormakoko ovat viime vuosina kasvaneet ollen 5-akselisilla kuorma-autoilla jo 15-16 m³. Kuljetuskaluston tyypin ja määrän valintaan vaikuttavat kuljetusmatkan ja olosuhteiden lisäksi kuorma- ja levityskonekoneiden yhdistelmä ja valittu työmenetelmä. Huonoissa olosuhteissa, lyhyillä kuljetusetäisyyksillä ja suljetuilla työmailla käytetään 2-akselisia maansiirtoautoja ja traktori-dumppereita. Näissä molemmat akselit on vetäviä ja lavarakenne on järeä, mikä soveltuu paremmin varsinkin kivien ja louheen siirtoon.

Tietyömaan maa- ja kivimassojen kuljetuksissa työkokonaisuus muodostuu kuormauksesta, kuljetuksesta, purusta ja paluusta kuormaushaualle. Kuljetusvälineen laskutus perustuu punnitustietoon ja ajomatkaan. Yleensä kuormaushaualle punnitaan materiaalmäärä ja tieto annetaan kuorma-auton kuljettajalle, joka kirjaa kuorman materiaalmäärän ja kuljetusmatkan purkupaikalle.

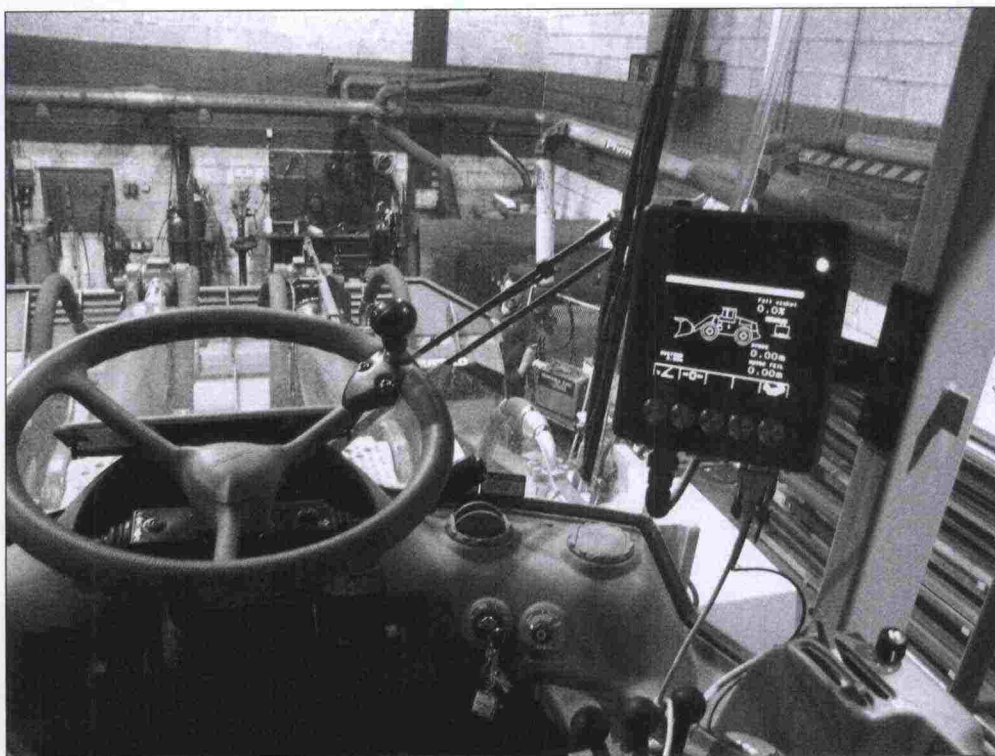
Tietyömaan kuljetusten ja kalustomäärän suunnittelussa ja tahdistuksessa pyritään siihen että kuorma- ja kuljetuskaluston kapasiteetit ovat yhtä suuret eikä työkoneille ja kuorma-autoille tule odotusta. Kuorma-autojen määrä valitaan kuorma- ja levityspuolen koneiden kapasiteetin ja kuljetusetäisyyden perusteella. Uuden teknologian käyttöönotto maarakentamisessa vaikuttaa myös kuljetuskaluston määrän ja kuormaushaualle kapasiteetin suunnitteluun. Esimerkiksi kantavien kerrosten rakentamisessa levityskoneena käytettävän 3D-ohjatun tiehöylän kapasiteetti on aiempaan verrattuna kasvanut kaksinkertaiseksi, mikä vaikuttaa koko kuljetus ja työkoneyhdistelmän mitoittamiseen. Parempaan kokonaistaloudellisuuteen päästään kuljetuskaluston määrää ja kuormaushaualle tehoa on selvästi lisäämällä.

Maa- ja kivimassojen kuljetukset muodostavat tienrakennustyömaalla merkittävän työvaiheen, joiden osuus on arviolta kolmannes maarakennustyömaan kokonaiskustannuksista. On arvioitu, että uuteen teknologiaan ja tarkkoihin

lähtötietoihin ja suunnitteluun perustuvalla kuljetusten ohjaamisella olisi mahdollista päästä varsinkin suurissa maarakennushankkeissa merkittäviin kustannussäästöihin. Tietyömaan massansiirtojen ohjausjärjestelmän kehittäminen edellyttäisi ensinnäkin olennaisten maarakenteiden ja varamaanottopaikkojen tilavuuksien ja määrien tarkkaa määrittämistä ja toiseksi toimivaa kuljetuskustannusten ja työkoneresurssien optimointijärjestelmää. Näistä tuloksena saatavan kuljetussuunnitelman toteuttamiseen ja seurantaan voidaan kehittää kuormauskoneiden ja kuorma-autojen ohjaus- ja seurantajärjestelmä. Tärkeimpiä ohjaus- ja seurantatarpeita tässä järjestelmässä ovat kuljetettavien materiaalmäärien, kuormaus- ja purkupaikkojen sekä ajomatkojen mittaus ja dokumentointi. Perusajatuksena on ohjata konetyötä siten, että massat siirretään suunnitelman mukaan ja siirtojen toteutumista voidaan uuden teknologian avulla seurata miltei reaaliajassa samalla päivittäen yleensä muuttuvaa suunnitelmaa. Lisäksi järjestelmän pitäisi dokumentoida kuljetussuoritteet automaattisesti laskutuksen pohjaksi. Kuvatus järjestelmän kehittäminen edellyttää laajaa kehitystyötä ja työkoneryhmän sekä kuorma-autojen varustamista tietokonepohjaisilla ohjaus- ja paikannusjärjestelmillä sekä uusilla langattomilla työkoneneiden ja työmaan ohjauskeskuksen välisillä tiedonsiirtojärjestelmillä.

4.2.2 Pyöräkuormain

Pyöräkuormain on tienrakennustyömailla selvästi yleisin kuormauskone ja samalla yleisin varsinainen maansiirtokone. Pyöräkuormaimet luokitellaan painon ja kauhakoon perusteella. Keskeinen osa kuormaimessa on kauha, joka on yleensä kokoluokkaa 1,5 ... 3 m³. Eri työolosuhteita ja materiaaleja varten on erilaisia kauhoja kuten hiekka- ja sorakauha sekä kivi- ja louhekauha. Lisäksi on monitoimikauha, jota voidaan käyttää sekä puskulevynä että kuormaus- ja kahmarikauhana.



Kuva 20. Pyöräkuormajaan asennettu 3D-ohjausjärjestelmä (Axiomatic Oy).

Pyöräkuormaimen tärkein tehtävä on maa- ja kalliomassojen kuormaus kuljetusvälineeseen, mutta sitä voidaan käyttää tehokkaasti myös maansiirtoon silloin kun siirtomatka on alle 200 m. Suuret pyöräkuormaimet soveltuvat hyvin maa-massojen leikkaukseen ja siirtoon suoraan penkereeseen sekä penkereen tiivistykseen ja muotoiluun.

Rakennemateriaalien kuormaus pyöräkuormaimella aloitetaan konekoon ja kauhan mitoituksella kuormaustarpeiden suuruuden mukaisesti. Kuormauksen käytännön työketjussa voidaan erottaa aloittavat työt, kuormaajan ajo materiaalin ottopaikkaan (yleensä rintaukseen), kauhan täyttö, kulku kauha täynnä, kauhan tyhjennys ja paluu takaisin rintaukseen. Työketju toistuu tehtäviltään hyvin samanlaisena kuormaustarpeiden mukaisesti. Kauhan täyttö lienee teknistaloudellisesti vaikeimmin automatisoitavissa (mm. rintauksen muoto muuttuu, materiaalin mahdolliset epähomogeenisuudet, koneen ajolinjojen muutokset, kuorma-autojen erilaisuus). Kuormattavan materiaalin punnitus kauhassa ja tiedonsiirto työmaanhallintajärjestelmään soveltuisi erinomaisesti automaation osatehtäväksi. Kaivoslouhintaan on kuitenkin onnistuttu kehitetty automaattisia louheen lastaus- ja purkujärjestelmiä. Monitoimikauha mahdollistaa pyöräkuormaajan käytön myös siirto- ja muotoilutehtäviin. Myös materiaaliominaisuustietoja voitaisiin hallita. Tällöin automaatio soveltuisi huomattavasti monipuolisemmin työmenetelmään.

4.2.3 Puskutraktori

Puskutraktori on teloilla liikkuva työkone, jota voidaan käyttää tierakennustyömaan raivaus, leikkaus-, siirto- ja kasaustöihin varsinkin pehmeällä maapohjalla. Puskutraktoria on tehokas myös tien luiskien tasauksessa sekä routaantuneen maan repijänä. Puskutraktorin perustyöväline on puskulevy, joka on yleensä suora. Uusimmissa koneissa puskulevy voi myös olla kallistuva. Kaivukoneella päästään usein puskutraktoria taloudellisempaan ja tehokkaampaan työsaavutukseen. Leikkaus- ja luiskien muotoilutöissä puskulevyn korkeuden 3D-ohjausta on mahdollista hyödyntää hienojakoisilla ja tasalaatuisilla maapohjilla.



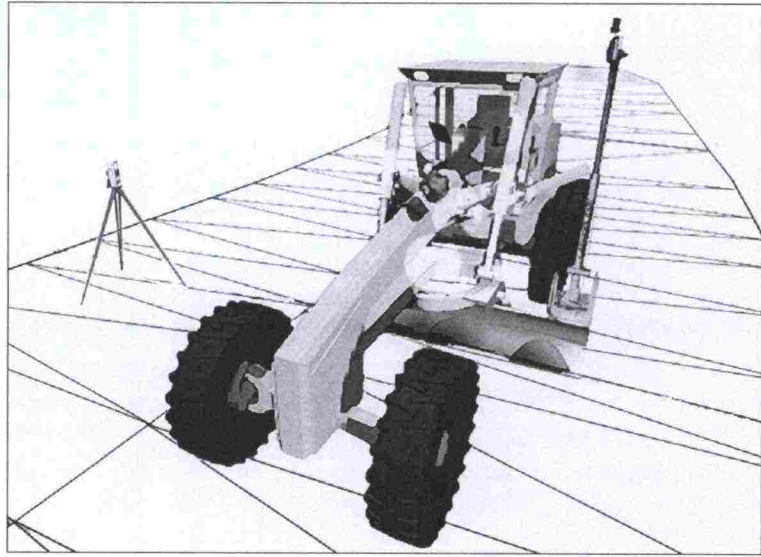
Kuva 21.
Puskutraktoriin asennettu 3D-ohjausjärjestelmä (Novatron Oy) työmaakokeissa Tampereella 2004.

Leikkaus- ja pengerrystyöt puskutraktorilla ovat tienrakennushankkeissa (ainakin Suomessa) kohtuullisen vähäisiä. Puskutraktorien työtehtäviä tienrakentamisessa ovat myös ulko- ja sisäluiskien tasaukset. Koneella suoritettavia erilaisia työtehtäviä ovat leikkaustyöt, muotoilutyöt, tiivistys- ja tasaustyöt sekä materiaalien kasaus. Käytännön työketjussa materiaalia levitetään eteenpäin puskemalla ja tasoitetaan lanaamalla paluun aikana. Teknisesti puskutraktoriin on toteutettavissa helpostikin erilaisia automaatiosovelluksia. Tarkkuusvaatimukset työn lopputulokselle ovat yleensä senttimetriluokkaa. GPS-paikannustekniikan tarkkuudet ja luotettavuudet ovat työhön pääsääntöisesti riittävät. Näistä osoituksena viime vuosien maarakennusteknologiamessuilla puskutraktorien automatisoituja ohjausjärjestelmiä on ollut esillä runsaasti.

4.2.4 Tiehöylä

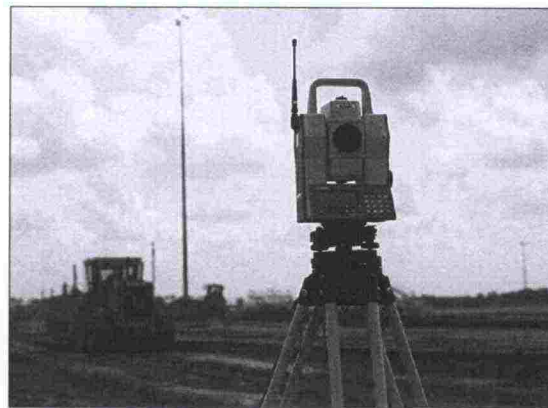
Tien päällysrakennetyövaiheessa jakavan ja kantavan rakennekerroksen levitys- ja muotoilutyöt tehdään yleisimmin tiehöylällä. Työketjussa voidaan erottaa aloittavat työt, materiaalin levitys ja muotoilu eteenpäin ajon aikana, paluu peräyttämällä teräpöytä ylhäällä sekä lopettavat työt. Aloittaviin ja lopettaviin töihin sisältyvät myös koneen siirrot työmaalle. Tiehöylän ohjauksessa oleellisinta on levitys- ja muotoiluterän korkeuden ja kaltevuuden säätö tiegeometrian mukaisesti. Tarvittavien mittausten ja säätöjen määrä on erittäin suuri. Myös tarkkuusvaatimukset ovat merkittäviä eli jopa ± 20 mm korkeussuunnassa (kantava kerros). 3D-paikannustekniikoiden ja automaattisen 3D-malliin perustuvalla teränohjauksella on päästävässä sekä tarkkuuteen että tehokkuuteen, johon ei ilman automaatiota kyettäisi. Työmenekkien säästöpotentiaalit ovat suuria. Tiehöylää käytetään rinnan yhdessä muiden työkoneiden kanssa, jolloin konetöiden onnistunut limitus ja jaksotus toisiinsa on sekä taloudellisesti että tienrakenteen laadun kannalta oleellista. Tiehöylää käytetään myös talvikunnossapidossa, jossa siinä ilmenee omanlaisia automatisoinnilla tehostettavia työtehtäviä.

Tiehöylässä pitkälle viety teränohjausautomaatiikka on todettu taloudellisestikin erittäin hyödylliseksi. Tierakenteiden viimeistely- ja muotoilutyössä automatiikka lisää tehokkuutta ja vähentää laatuvariaatiota. Automaatiikka parantaa tiehöylän tehokkuutta vähentyvien yliajokertojen perusteella. Tutkimuksissa yliajokertojen määrän on todettu vähenevän 3D-ohjausjärjestelmällä työskenneltäessä puoleen. Viimeistelytyön tehokkuuden saavuttamisessa on olennaista automaation taso. Kehittyneimmissä järjestelmissä tiehöylän terää voidaan myös automaattiohjauksen aikana ohjata manuaalisesti siten, että murskekerros muotoutuu heti oikeaan korkeuteen ja kaltevuuteen. Terän kaltevuus-, korkeus- ja linjaohjauksen tulisi toimia koko ajan eri työvaiheissa. Tiehöylän vaihtaessa ajosuuntaa tielinjalla, terän kaltevuus ja korkeuden tulisi muuttua automaattisesti suunnitelman mukaiseksi.



Kuva 22. Suomalainen tiehöylän 3D-ohjausjärjestelmä on toiminnoiltaan ja tekniseltä suorituskyvyiltään edelläkävijä maailmassa (tuotteistaja Roadsys Oy).

Kun robottitakymetri on pystytetty ja alustettu työmaalle, aloitetaan mittalaitteen kauko-ohjaus radioyhteyden kautta käynnistämällä se työkonesta. Ohjausjärjestelmässä takymetriä voidaan ohjata näyttämällä kartalta suunta tai kohde mihin sen pitää kääntyä. Mahdollisuus ohjata takymetriä kauko-ohjauksella nopeuttaa työn aloittamista. Yhtä takymetriä voidaan tämän avulla käyttää jopa useampien koneiden ohjauksessa vuorotellen. Myös mittaryhmä voi hyödyntää samaa takymetriä. Prisman automaattihaku vähentää työn aikaisia katkoja.



Kuva 23. Robottitakymetri paikantaa 3D-ohjausjärjestelmällä varustettua tiehöylää (Trimble).

Työmaalla esiintyy aina työn jossakin vaiheessa tai osassa virheitä, jotka vaikuttavat lopputuloksen tarkkuuteen. Tämän vuoksi ohjausjärjestelmässä tarvitaan toimintoja, joilla kuljettaja voi valvoa tai tarkastaa järjestelmän toimivuutta tai työn jäljen laatua jo työn aikana. Käyttöliittymässä tarvitaan toimintoja joilla kuljettaja voi tarkkailla esimerkiksi koneohjausmallin laatua tai terän asentoa rakenteen poikkileikkauksen ja tien reunalinjan suhteen. Myös työkonen etäisyys mittalaitteesta ja paalulukema tulisi näkyä numeerisena arvona käyttöliittymässä. Esimerkiksi terän asennosta näytöllä, paalulukemasta tai graafiselta

karttanäytöltä tarkastaa onko koneohjausmalli oikea. Poikkileikkausnäytöstä kuljettaja näkee terän etäisyyden rakenteen pintaan ja taiteviivoihin sekä graafisesti että myös numeroarvoina.

Työmenetelmästä riippuen, ja jos ohjausjärjestelmän ominaisuudet sen mahdollistavat, rakenteen laatumittauksen tekeminen olisi järkevää tehdä jo työn tekemisen yhteydessä tai heti sen jälkeen. Ehkä suurin hyöty saadaan reaaliaikaisen laatumittauksen kautta. Kun poikkeamat rakenteissa huomataan työmaalla mahdollisimman aikaisessa vaiheessa, korjaustoimenpiteet voidaan aloittaa heti, kun työstökoneiden ollessa vielä paikalla. Rakenteiden toteuttaminen kerralla valmista -periaatteella tehostaa koko työprosessia. Tiehöylässä laatumittauksien toteuttaminen mahdollistaa rakennekerrosten korkeuden ja kaltevuuden tarkemmittaukset ja dokumentoinnin. Tiehöylän laatumittauksilla voidaan tehdä myös esimerkiksi aloitettavan työmaan korkojen tarkistusmittauksia. Tämä mahdollistaa esimerkiksi massamenekin paremman hallinnan ja vähentää siltä osin riskejä.



Kuva 24. Automatisoitu tien rakennekerroksen muotoilu ja tasaus käynnissä tietyömaalla. Kuljettajan työtä helpottaa ratkaisevasti automaattisesti tienuunnittelijan luoma geometria seuraava 3D-teränohjausjärjestelmä.

Tulevaisuudessa työmaan laadunvalvonnan tehtäviä voitaisiin entistä enemmän integroida työkoneiden ohjausjärjestelmiin. Ohjausjärjestelmän graafinen näyttö, josta kuljettaja näkee rakenteen korkeuden ja kaltevuuden sekä työkoneen terän asennon mahdollistaa työnaikaisen laadunvalvonnan. Kuljettaja voisi näytöltä havaita esimerkiksi aiemmin tehdyn rakenteen painumat, mikä helpottaisi esimerkiksi materiaalin lisätarpeen arviointia. Toisaalta työkoneiden automaattiseen ohjausjärjestelmään kuuluvien paikannusjärjestelmän ja muiden antureiden mittaamaa tietoa voidaan tallentaa ja käyttää sitä myöhemmin tarkastamaan laadunvalvontaan. Työkohteen valmistuttua rakenteen toteutumattiedot voidaan siirtää työkoneen tietokoneelta langattomasti esimerkiksi työn tilaajan käyttöön.

Tienrakentamisessa kaikki suunnitelmat ja toimenpiteet on perinteisesti sidottu tielinjan paalutukseen. Ohjausjärjestelmään tarvitaan reaaliaikainen paalulukeman näyttö, josta kuljettaja voi tarkkailla sijaintiaan tielinjalla. Tämä toiminto helpottaa kuljettajaa esimerkiksi paikantamaan koneohjausmallissa mahdollisesti esiintyvät virheet ja kontrolloimaan muutenkin mallin oikeellisuutta.

Ohjausjärjestelmän pystytysvaiheessa kun robottitakymetri on asennettu ja alustettu, takymetriä voidaan ohjata radioyhteyden kautta työkonesta käsin. Tavoitteena on, että takymetri pyrkii automaattisesti kiinnittymään prismaan hetkellisen näköesteen jälkeen. Tämä nopeuttaa työn aloittamista ja prisman automaattihaku vähentää työn aikaisia katkoja. Automaattinen teränohjaus voidaan kytkeä päälle heti takymetrin pystyttämisen jälkeen viiveettä ja kaltevuus/korkeusohjaus toimii ilman keskeytyksiä eri työvaiheissa. Esimerkiksi höylän vaihtaessa ajosuuntaa tielinjalla, terän kaltevuus ja korkeus muuttuu automaattisesti suunnitelman mukaiseksi eri tilanteissa. Tämä ominaisuus vähentää katkoja työssä ja vapauttaa kuljettajan ohjaamaan työmaata. Automaattinen ohjaus toimii esimerkiksi eritasoliittymien rakentamisessa, joissa on jyrkkiä kaarteita ja poikkileikkauksen kallistuksenmuutosalueita, yhtä luotettavasti ja tarkasti kuin suorilla tieosuuksilla. Työn jäljen tarkkuus riittää kantavan rakennekerroksen toleransseihin.

Terän aurauskulmaa voidaan tiehöylän liikkeessä kääntää molempiin suuntiin murskeen levityksen ja muotoilun aikana. Tämä mahdollistaa murskeen ohjaamiseen haluttuun suuntaan ja minimoi reunapalteen muodostumisen. Tiehöylän teräpöytää voidaan liikuttaa murskeen tasauksen aikana molempiin suuntiin, mikä mahdollistaa suuremman työskentelyleveyden ja murskeen ohjaamiseen haluttuun suuntaan ja minimoi reunapalteen muodostumisen. Murskekerroksen tiivistymisvaraa voidaan huomioida ja säätää kuljettajan toimesta offset-toiminnolla, mikä mahdollistaa tiivistämisvaran säätämisen levitettävän kerrospaksuuden mukaan. Ohjausjärjestelmä sisältää toiminnot ohjaustarkkuuden sisäiseen laadunvalvontaan eli kuljettaja voi tarkkailla käyttöliittymästä terän asentoa rakenteen poikkileikkauksen ja tien reunalinjan suhteen koko ajan järjestelmän toimiessa ja kuljettaja näkee työkonen etäisyyden mittalaitteesta numeerisena arvona käyttöliittymässä. Kantavan kerroksen toleransseihin pyrittäessä työkonen etäisyys mittalaitteesta ei saisi olla yli 200 m.

Kuljettajan on hyödyllistä nähdä terän etäisyyden myös numeroarvoina rakenteen pintaan ja taiteviivoihin. Kun konetta ajetaan taiteviivan kohdalle kuljettaja näkee työkonen paalulukemasijainnin 1 m tarkkuudella. Ohjausjärjestelmä mahdollistaa rakenteiden korkeuden ja kaltevuuden tarkemittaukset ja dokumentoinnin haluttuun formaattiin ja halutulta paalulukemalta. Ohjausjärjestelmässä on toiminnot tiehöylän työmenekin mittaukseen ja tietojen tallennuksen. Koneohjausmallit ja laatutiedot voidaan siirtää ohjausjärjestelmään ja sieltä pois sekä levykkeellä että langattoman yhteyden kautta. Tärkeää on myös, että ohjausjärjestelmä toimii tarvittaessa myös ilman 3D-paikannusta eli sisältää nivelohjauksen, kallistusautomaatiikan ja/tai joystick-ohjauksen, jos 3D-paikannukseen perustuvaa automaattiohjaus ei ole käytettävissä.

Työkoneeseen jo sijoitettu tietokone mahdollistaa myös muiden tarvittavien lisätarpeiden toteutuksen ilman uusia laiteinvestointeja. Yksi näistä voisi olla langaton tiedonsiirto koneen ja toimiston välillä. Niin koneohjausmallien kuin laatutietojenkin siirto langattomasti suunnittelijan ja työkoneen välillä vähentää tietyömaan työtehtäviä ja lisää tehokkuutta. Suunnitelmien muutokset tai korjaukset voidaan päivittää työmaan käyttöön hyödyntämällä langatonta tiedonsiirtoa tehokkaimmin. Eri ohjaus- ja laadunvalvontatoimintoja kannattaa jatkossa integroida samaan tietojärjestelmään, jolloin työkoneen ohjaamossa laitteet voidaan myös sijoittaa työn tekemisen ja ergonomian kannalta paremmin.

Älykäs tietyömaa hankkeessa kehitetyllä tiehöylän 3D-ohjausjärjestelmällä varustettu Vammas RG 17 -tiehöylä oli kesän 2002 aikana E18-moottoritieellä 740 h ajan töissä. Työt tehtiin kahdella työjaksolla 1.5-30.7.02 ja 1.9-18.10.02. Työkohteiden pinta-ala yhteensä noin 460 000 m². Tällä perusteella tämän 3D-tiehöylän keskimääräinen työvaihekapasiteetti (K4) oli kesän 2002 aikana moottoritietöyömaan jakavan ja kantavan kerroksen työkohteissa noin 620 m²/h. Tiehöylän kapasiteetti oli noin kaksinkertainen verrattuna perinteisellä menetelmällä ohjattuun tiehöylään.

Työmaan henkilöstön havaintojen mukaan jakavan kerroksen kiilauksessa levitysteho oli parhaimmillaan noin 15 000 m² työvuorossa. Kohteena oli moottoritien 11,75 m leveät ajokaistat, joita kiilattiin noin 1150 m matkalta työpäivän aikana. Parhaimmillaan tiehöylälle kuljetettiin mursketta kymmenellä kasetti kuorma-autolla noin 300 t mursketta tunnissa. 3D-tiehöylän murskeen tasaus- tai levitystehoa ei työmaajakson aikana erikseen mitattu. 3D-ohjausjärjestelmän tarkkuus oli jo aikaisemmissa työmaatesteissä mitattu kattavasti ja havaittu riittävän tarkaksi tienrakentamistyöhön. Koejaksolla 2002 tiehöylän laatumittaus-toiminnolla tehtyjen tarkemmittausten korkeuspoikkeamien keskiarvo oli 2-3 mm ja keskihajonta 10 - 12 mm (liite 2). Samalla mittausjaksolla sivukaltevuuspoikkeamien keskiarvo oli 0,5 % ja keskihajonta 0,5 %. Mittaustulosten perusteella järjestelmän tarkkuus todettiin riittäväksi kantavan kerroksen rakentamiseen Tiehallinnon asettamien toleranssien puitteissa. Erillistä suunniteltua kontrollimittausta työnjäljestä ei saatujen tietojen mukaan tässä projektissa tehty.

Kahden työjakson aikana tehtyjen työmäärien perusteella ohjausjärjestelmän voidaan todeta toimineen kokonaisuutena luotettavasti. Ohjausjärjestelmän perustoiminnot (korkeuden ja kaltevuuden ohjaus) toimivat koko ajan hyvin. Myös paikannusjärjestelmänä käytetty robottitakymetri toimi koko ensimmäisen jakson ajan luotettavasti. Toisella työmaajaksolla otettiin käyttöön eri mittalaite, jossa havaittiin ajoittain ongelmia radiolinkin toiminnassa. Nämä ongelmat saattoivat johtua muista samalla alueella käytetyistä vastaavista mittalaitteista ja niiden radioliikenteestä. Vaihdettaessa mittalaite ongelmat poistuivat. Robottitakymetrien yleistyessä ohjausjärjestelmässä tarvitaan useampia kanavia (taajuuksia) tietoliikenteelle. Ensimmäisellä työmaajaksolla vikaantui tietokoneen virtalähde, joka saatiin korjattua tietokonevalmistajan (Sunit Oy) ja huoltoliikkeen (Primatel Oy) yhteistyönä hyvin nopeasti yhden vuorokauden aikana. Toisella työjaksolla rikkoontui teräpöydän yksi hydraulisylinteri kaksi eri kertaa. Viat johtuivat maadoitukseen puutteellisuudesta. Nopean huoltotoiminnan ansiosta viat saatiin korjattua vuorokauden sisällä eikä niistä aiheutunut merkittävää viivästystä työmaalle.

Työmaatestien aikana kehitettiin tiehöylään laatumittaustoiminnot, jotka toimivat jo ensimmäisen työmaajakson aikana luotettavasti. Laatumittauksessa rakennekerroksen korkeus ja kaltevuus dokumentoidaan halutuista kohdista. Laatumittauksiedot paikannetaan paalukemaan ja tien taitelinjaan perustuen. Kapasiteettimittaukseen kehitettiin luotettavuuden parantamiseksi manuaaliset toiminnot, joiden avulla kuljettaja voi tallentaa päivittäisen työalueen ja koneen levittämän materiaalmäärän. Kapasiteettimittauksen automaattisten toimintojen käyttö ja testaus jäi kiireen vuoksi kuljettajien toimesta vähäiseksi.

4.2.5 Murskeenlevitin

Murskeenlevitin on Suomessa kehitetty pääasiassa tienrakennukseen tarkoitettu, pyöräkuormaimeen kiinnitettävä materiaalin levitin. Koneetta käytetään tien sitomattomien päällysrakenteiden levitykseen ja sen etuja muihin menetelmiin verrattuna ovat levitystyön tehokkuus ja materiaalisäästöt. Levitystyössä kuorma-auto purkaa työkoneen liikkeessa materiaalin levittimeen. Samanaikaisesti pyöräkuormain työntää levitintä eteenpäin. Tuloksena on tasapaksu materiaali-kerros, joka tiivistetään jyrällä ja muotoillaan vielä tiehöylällä.

Murskeenlevittimen tavoitteena on levittää tasainen tierakennekerros suunnitelman mukaiseen korkeuteen ja kaltevuuteen. Geometrialtaan yksinkertaisilla tasaisilla tieosuuksilla järjestelmä toimii manuaalisesti tai lasertaso-ohjauksella kohtuullisen hyvin. Laser- ja manuaaliohjauksella pohjan epätasaisuus tai tie-suunnitelman sivukallistuksen muutososuudet huonontavat selvästi lopputuloksen tarkkuutta. Rakennettavan materiaali-kerroksen paksuutta ja kaltevuutta levittimessä ohjataan murskeen päällä kelluvan terällä. Työmenetelmässä kone pysähtyy kuorma-auton kiinnityksen ajaksi ja ajaa eteenpäin noin 5-10 km/h nopeudella kuormaa purettaessa. Automaattiohjaus on tarpeen, koska levitintä säädetään sen liikkeessa. Terän korkeutta ja kaltevuutta säädetään koneessa eturenkaiden hydraulisella korkeussäädöllä ja ajolinjaa ohjataan työkoneen ja kuorma-auton kuljettajien yhteistyönä.

Murskeenlevittimen 3D-ohjausjärjestelmän toiminnallinen testaus tehtiin syksyllä 2003 ratatyömaalla Mäntsälässä. Koneohjausmalli tehtiin 3D-mittalinjaan ja radan poikkileikkaukseen perustuen. Koneohjausmallin korko oli 2,2 m mittalinjan alapuolelle pengerrakenteen yläpinnassa. Mallin keskiharja asetettiin mittalinjan kohdalle sekä kahden prosentin sivukallistukset sekä ohjauslinjat koneen leveyden mukaan 3,2 m välein. Suunnitelman 3D-linjojen tiedonsiirto ei suoraan onnistunut mittaryhmän käyttämän 3D-Win ohjelmistosta TerraStreet -ohjelmaan. Tästä johtuen suunnitelmatieto jouduttiin ensin tulostamaan pistetietoina ja siirtämään sitten Terra-ohjelmaan. Tiesuunnitelman geometriatiedot tulisi saada suoraan alkuperäisestä suunnitelma-aineistosta koneohjausmallinnukseen.

Testauspaikkana oli louhepengeri Taavettikorven alikulkusillan luona paaluvälillä 74 800–75 000. Mallin tiedonsiirrossa työkoneen tietokoneelle oli aluksi teknisiä ongelmia, jotka sitten ratkesivat. Ohjausjärjestelmän kuljettaja/käyttäjä voi siirtää koneohjausmallin USB-muistikorttia hyödyntäen. Penkereelle levitettiin pohjan tasauskerros ennen ohjausjärjestelmän testausta. Murskeenlevityskoneen kuljettajan ja automiesten yhteistyö on työn sujumisen kannalta tärkeää. Levittimen kuljettajan tehtävänä oli käytännössä ohjata kuorma-autojen purkunopeutta. Kuorma-auton on tarkoitus vetää konetta samalla kun purkaa kuormaa. Murskeenlevittimen ollessa käytössä työmaalle tarvitaan autoryhmä, joissa on

samanlainen peräosa kuin asfalttimassan ajoon tehdyissä kuorma-autoissa. Murskeenlevittimen automaattinen ohjaus on perusteltua jos myös muut tien päällysrakentamisen työvaiheet rakennetaan 3D-malleihin perustuvia ohjausjärjestelmiä ja työkoneita hyödyntäen.



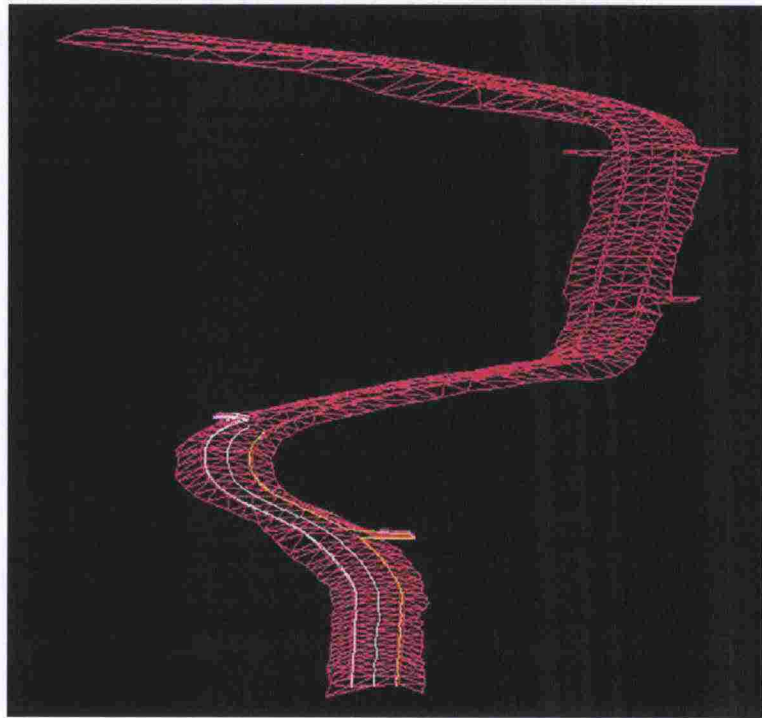
Kuva 25. Murskeenlevittimen 3D-ohjausjärjestelmän (Roadsys Oy) kokeilu tietyömaalla Mäntsälässä 2003.

4.2.6 Stabilointijyrsin

Stabilointijyrsintä käytetään tierakenteen parantamishankkeissa tierakenteen kantavien rakenteiden jysintään ja stabilointiin. Työmenetelmä on käytössä alemman luokan teiden parantamishankkeissa. Työmenetelmän ensimmäisessä vaiheessa vanha päällyste ja kantava sitomaton rakennekerros jysitään rikki ja sekoitetaan toisiinsa. Seuraavaksi tien poikkileikkausgeometriaa parannetaan tarvittaessa lisäämällä kiviainesta ja muotoilemalla poikkileikkaus suunnitelman mukaiseksi tiehöylällä. Toisen jysintä- ja sekoitusvaiheen aikana rakennekerros stabiloidaan bitumilla tai muulla sideaineella. Tien uudisrakennushankkeissa stabilointijyrsintä käytetään valmiin kantavan kerroksen stabilointiin paikalla sekoitusmenetelmällä. Työmenetelmänä käytetään joko vaahtobitumistabilointia tai emulsiostabilointia. Ohjaustarpeita ovat jysintäsyvyys (kerrospaksuus), jysinnän sivukaltevuus, sideaineen määrä ja lisäaineiden (vesi) määrä.

Stabilointiin tarvittavan sideaineen kuten bitumin suhteutus suunnitellaan ennakolta tielinjan maalajiominaisuuksiin perustuen. Suunnitelman tuloksena saadaan sideaineen syöttömäärät (l/m^3), jotka voi tarpeen mukaan muuttua tielinjalla. Käytännössä suunnittelu on perustunut muutamiin maalajikokeisiin, jotka eivät välttämättä käytännössä anna aina tierakenteesta riittävän luotettavaa kuvaa koko tielinjan matkalta. Rakenteen parantamisen suunnittelussa ollaankin siirtymässä perinteisistä tutkimusmenetelmistä (kantavuusmittaus, kairaus ja näytteenotto) uuteen enemmän systemaattiseen tierakenteen tutkimukseen perustuvaan menetelmien käyttöön. Näytteenottoa voidaan täydentää maatulka- mittausten, jolloin saadaan kattavampi kuva maapohjasta koko tielinjan matkalta. Maatulka- ja koordinaattimittausmenetelmiä yhdistämällä voidaan hankkia koordinaatistoon sidottua lähtötietoa tien rakenteen parantamisen suunnittelun lähtötiedoiksi.

Stabilointijyrsimen 3D-ohjauksen työmaakokeissa tavoitteena oli selvittää tien rakenteenparantamisen työmenetelmien automatisointimahdollisuuksia testamalla jyrsimen koneohjausjärjestelmän toimivuutta työmaolosuhteissa. Projektin käyttöön saatiin pilotointikohteeksi noin kilometrin pituinen tieosuus rakenteen parantamisen työkohteessa. Työmaatestien ennakkotoimenpiteinä tehtiin tieosuuden pintamallin mittaus osittain RTK/GPS-mittauksena ja osittain robottitakymetrillä. Jyrsimen koneohjausmalli koeosuudelle suunniteltiin MicroStation/Terra-ohjelmilla. Ohjausjärjestelmäsovelluksen takymetri-paikannuksella toteutti Roadsys Oy. Työmenetelmän päävaiheet olivat päällysteen jyrsintä 100-200 mm, tiivistys, kastelu, höyläys muotoon, tiivistys, viimeistelyhöyläys, tiivistys sekä päällystäminen. Kohteen laatumittauksiin sisältyi poikkikaltevuuksien mittaustaus 100 m välein ja tiiveysmittaukset Troxler-menetelmällä satunnaisin välein. Työkohteessa oli myös käytössä työmaan laatumittauksien lähetyksen langattomasti ja reaaliaikaisesti kommunikaattorilla urakoitsijan palvelimelle.



Kuva 26. Työmaakokeita varten luotu stabilointijyrsimen 3D-koneohjausmalli.

Koneohjausmallin lähtötietojen mittauksessa mittausnopeus autolla oli parhaimmillaan noin 15-20 km/h. Satelliittigeometrian huonontuessa (PDOP suuren) nopeutta oli vähennettävä. Radiomodeemiyhteys tukiaseman ja liikkuvan yksikön välillä ei toiminut luotettavasti todennäköisesti mäkisen maaston vuoksi. GSM-modeemiyhteys GPS-vastaanottimien välillä toimi hyvin ilman katkoksia.

Tien reunan ohjauslinjan seuraaminen näytöltä osoittautui mahdolliseksi. Reunalinjojen paikan "oikeellisuus" vaihteli kokeen aikana (syynä ehkä asemapisteidien tai mallipisteiden poikkeamat todelliseen). Graafinen näyttö antaa kuljettajalle yleiskuvan koneen asemasta ja ohjaustarpeesta. Linjan etäisyyden numeronäyttö antaa tarkemman tiedon, jota voidaan käyttää tarkempaan ohjaamiseen. Kaltevuusmittarin lukema ja suunnitelmasta saatava ohje osoittautui hyvin kuljettajan seurattavaksi. Käyttöliittymän eri näyttöjen havainnollisuus helpottaa kuljettajan ohjaustietojen seuraamista.



Kuva 27. Stabilointijyrsimen 3D-ohjausjärjestelmän työmaakokeet – robottitakymetri paikantaa jyrsinrumpuun asennettua prismaa (Andament Oy, Roadsys Oy, Oulun yliopisto).

Ohjausjärjestelmä näytti työkoneseen kuljettajalle kaltevuusohjeen, koneen todellisen kaltevuuden, jyrsimen rummun etäisyyden ohjauslinjaan sivusuunnassa ja jyrsimen alareunan etäisyyden jyrsinpintamalliin. Ohjausjärjestelmän käyttöliittymän räätälöinti eri työkonille osoittautui tarpeelliseksi. Työmaatesteissä käytetyn runko-ohjattavan jyrsimen tarkka ohjaus ylipäättään ja myös ohjaavaa järjestelmää hyödyntäen on käytännössä vaikeaa, koska ohjausliikkeet ovat nykiviä ja kone heilahtelee käännettäessä. Sovelluskohteena alemman luokan teiden korjaus ei ehkä ollut sopivin kohde, vaan kehitetty ohjaus/mittausmenetelmä yhdistettynä tiehöylän 3D-ohjaukseen olisi käyttökelpoisin esimerkiksi valtatietasojen teiden tiegeometrian korjaushankkeissa. Tämän RP-työvaiheen kehittämisessä tavoitteena voisi olla pyrkiä tarkan tienpinnan muotojen 3D-mittauksen ja 3D-mallinnuksen perusteella suunnittelemaan tien pituus ja poikkigeometria uudella tavalla ja käyttämään koneohjausta suunnitelman toteuttamiseen.

4.2.7 Kaivukone

Kaivukone on tietyömaan yleiskone, jolle tulee yleensä eniten käyttötunteja tietyömaalla. Kaivukoneeseen on laaja valikoima lisälaitteita, mutta pääasiallisina tehtävinä ovat edelleen kaivu- ja kuormaustyöt. Esimerkiksi materiaalin lastauksessa kaivukoneen käyttö on suositeltava, koska materiaalin lajittuminen on yleensä vähäisempää kuin pyöräkuormaimella lastattaessa. Tela-alustainen kaivukone on hyvän kantavuutensa vuoksi käytetyin kone pohjatöissä. Pyöräalustainen kaivukone tarvitsee kantavan työskentelyalustan, mutta siirtonopeus työmaiden välillä on parempi. Myös kuivatus-, leikkaus-, pengerrys- ja materiaalin vastaanottotyötä voidaan tehdä kaivukoneella. Kuokkakauha on yleisimmin käytössä oleva kaivukoneiden työväline, jonka edullisin työskentelyalue on koneen ajotasossa tai alapuolella. Vaativimmissa luiskatöissä käytetään kääntyvää ja pyörivää kauhaa tai useita metrejä leveää luiskan muotoiluun kehitettyä erikoiskauhaa.

Kaivukoneissa on yleisesti käytössä suhteellista kaivusvyvyttä ja tasoa ohjaavia järjestelmiä, joissa ei kuitenkaan hyödynnetä 3D-malleja tai 3D-paikannusta koneen ohjaukseen. Myös muutamia kaivukoneen tietyissä olosuhteissa toimivia 3D-ohjausjärjestelmiä on markkinoilla. Kaivukoneen rakenteesta ja vaikeista työskentelyolosuhteista (esimerkiksi huonosti kantavat pohjamaat) johtuen hyvin eri tilanteissa toimivaa 3D-ohjausjärjestelmää ei ole vielä kehitetty.

Yleensä kaivukoneilla on melko matala tuntiaskutushinta minkä vuoksi myös ohjausjärjestelmän kehittämisessä olisi aluksi pyrittävä edullisiin ja yksinkertaisiin ratkaisuihin. Kaivukoneen työmenetelmästä johtuen koneen ohjaukseen useimmissa kohteissa voisi soveltua kuljettajaa ohjaava koneohjaus- ja dokumentointijärjestelmä, joka näyttää visuaalisesti tai numeroarvona kuljettajalle työkonteen kauhan tai terän korkopoikkeaman rakenteen suunnitelmapiinnasta. Järjestelmän tulisi sisältää myös valmiin rakenteen poikkeamien dokumentointiin tarvittavat toiminnot. Kehittämistavoitteeksi voidaan asettaa ominaisuus, jossa yhtä robottitakymetriä voidaan käyttää työvuoron aikana vuorotellen useamman työkonteen ohjaukseen. Näin on mahdollista päästä työkonetta kohden pienempiin ohjausjärjestelmän hankintakustannuksiin.

Kaivukoneen normaaliin työketjuun kuuluvat aloittavat työt, materiaalin otto kauhaan, kauhan kääntö ja purku sekä lopettavat työt. Yleisin työtekniikka on kuokkakaivu. Koneen hetkittäisen asennon ja kaikkien eri liikevapaustaidien hallinta vaatii kuljettajalta perinpohjaista harjaantumista. Esimerkiksi koneen stabiliteetin säilyttäminen on hyvin hienovaraisista ohjauksista ja säätöä kuljettajalta vaativa tehtävä. Kokemattomalle kuljettajalle työ voi olla vahinkoaltista ja jopa vaarallista. Pengerrystöissä kaivukone muotoilee ja viimeistelee rakennekerroksia ja tieluiskia täysin kolmiulotteisesti. Työskentelyssä tarvittavan kaivukoneen kääntökulma tulisi olla mahdollisimman pieni. Geometriset tarkkuusvaatimukset ovat leikkaus- ja pengerrystöissä yleensä $\pm 5 \dots \pm 10$ cm, viimeistelytyön vaatimukset voivat olla tiukempiäkin. Siten 3D-ohjaus voi viimeistelytyöissä olla välttämätön.

Kaivukoneautomaation sovelluskehityksissä on jouduttu ratkaisemaan työkonteen keskiakselin ympäri pyörivän eli kaivukonealustaisen koneen kinemaattinen malli, jonka perusteella 3D-ohjausjärjestelmä on voitu toteuttaa. 3D-malliin perustuvan ohjausjärjestelmän hyödyntäminen edellyttää koneen paikan ja asennon reaaliaikaista mittaamista. Kaivukoneen ohjauksessa paikannusjärjestelmäksi tarvitaan esimerkiksi kaksi GPS-antennia/vastaanotinta sekä kallistus- ja kulma-anturit rungon asennon mittaamiseen. Lisäksi laserskannausteknologian hyödyntäminen koneen ohjauksessa ja työn jäljen tai massojen mittauksessa kannattaisi jatkotutkimuksissa selvittää.

Tien rakennekerrosten rakentamisessa kaivukoneen 3D-ohjauksessa voidaan käyttää samantyyppistä koneohjausmallia kuin esimerkiksi tiehöylän 3D-ohjausjärjestelmässä. Tierakentamisen kuivatustöissä pysyvät avo-ojat ja salaojat rakennetaan tiesuunnitelmien osoittamaan paikkaan ja korkeuteen. Työkoneohjauksen hyödyntämiseksi ojien pohjat ja ojaluiskien kantit suunnitellaan 3D-taiteviivoina tai -malleina. Tällöin ne on mahdollista edelleen mallintaa koneohjaustiedoston 3D-pinnoiksi ja -ohjauslinjoiksi.

Axiomatic Technologies Oy on yksi suomalaisista kaivukoneiden ohjausjärjestelmien kehittäjistä (BPS, Bucket Positioning System eli kauhan sijaintijärjestelmä). Yritys hyödyntää järjestelmissä uusinta teknologiaa eli CANOpen-antureita ja -väyliä sekä suomalaisen valmistajan kiihtyvyyssantureita. Nykyinen kaivukoneen BPS-järjestelmä on kuljettajaa ohjaava ja avustava kaivusvyöryjärjestelmä. Seuraavana kehitysaskelena on koneohjausmalleihin ja GPS-paikannukseen perustuva 3D-ohjausjärjestelmä. BPS-järjestelmiä myy jo muutamia kymmeniä lähinnä pohjoismaihin. Samaa teknologiaa perustuvaa suomalaisen Unisto Oy:n Movax-pontiniskemisen ohjausjärjestelmää myy tähän mennessä noin pari sataa ympäri maailmaa. Toinen suomalainen kaivukoneiden ohjausjärjestelmävalmistaja jo merkittävän kansainvälisen markkina-aseman saavuttanut yritys on Novatron Oy.



Kuva 28. Suomalaista Axiomatic Oy:n BPS-kaivukonejärjestelmää esiteltiin Axiomaticin osastolla Bauma'2004-teknologiamessuilla Münchenissä.

Kaivukoneen kuljettajaa ohjaavaa järjestelmää testattiin Riihimäellä kaatopaikatöyrymaalla. Kaatopaikan pohjan rakenteiden suunnitelma saatiin koneohjausmallia varten. Koneohjausmalli muodostettiin TerraSolid Oy:n ohjelmalla saadun suunnitelma-aineiston perusteella. Ohjausjärjestelmää käytettiin kannettavalle ajoneuvotietokoneella kaivukoneen ohjaamosta. Myös mittalaitteena käytetyn robotitakymetrin ohjaus toimi kannettavalta tietokoneelta. Testatun ohjausjärjestelmän toimintaperiaatteena oli toimia kuljettajaa ohjaavana järjestelmänä josta kuljettaja voi havaita rakenteen korot automaattisesti kun kauha lasketaan rakenteen pintaan. Testaus aloitettiin koetyömaan katselmuksella ja takymetrin orientoimilla. Liitospisteiden huonon näkyvyyden vuoksi orientoimissa oli aluksi jopa 25 cm xy-virhe, mutta z-koordinaatin osalta ei virhe ylittänyt toleransseja. Ennen testausta työmaalla tarkastettiin mallin vastaavuus suunnitelmaan. Mallin tarkistus ja korjaukset tehtiin TerraSolid Oy:n ohjelmalla. Tarkastuksessa havaitut ylimääräiset pisteet poistettiin ja malli kolmioitiin uudestaan. Samalla tehtiin myös suunnitelman koordinaatiston x- ja y-akselien suunnan vaihtaminen. Ohjausjärjestelmän kokoaminen kaivukoneeseen suoritettiin kiinnittämällä prisma

kaivukoneen puomin sylinteriin noin 3,6 m etäisyydelle kauhasta. Takymetrin radioyhteyden ennakkotestaus tehtiin tietokoneella ensin autossa ja sen todettiin toimivan hyvin. Työmaalla mittaryhmän käytössä oli oma robotti-takymetri, jota ohjattiin Trimblen Geodatwin-näppäimistöllä. Takymetria käytettiin myös testauksessa saavutetun työn jäljen kontroilointiin.



Kuva 29. Työkoneiden ohjaus - suunnittelijan luoma 3D-geometriatieto on siirretty koneohjausmalliksi työkoneen ohjausjärjestelmään – esimerkkinä Suomessa kehitetty kaivukoneen BPS-ohjausjärjestelmä. Kuvassa 3D-paikannus tehdään GPS-järjestelmällä.

Testauksen tavoitteena oli muotoilla leikkauspinnan rakennetta ohjausjärjestelmää hyödyntäen. Nykyisen maanpintaa leikattiin vajaan metrin kerros. Käytännössä kuljettaja teki koneen toiminta-alueelle maa-aineksesta tason mallin osoittamaan korkoon. Näiden aputasojen avulla niiden välinen alue muotoiltiin kuljettajan toimesta. Lopputuloksen korkeustarkkuuden testaus tehtiin kaivamistyön jälkeen mittaryhmän toimesta. Tarkemittauksen mukaan valmiin pinnan korkeus poikkesi noin 4-6 cm referenssimallin korkotasosta. Koneen ja kauhan xy-paikan tarkkuutta havainnoitiin silmämääräisesti koneohjausmalliin nähden.

Prisman seurauksella normaalilla robotti-takymetrillä toimii yllättävänkin luotettavasti, vaikka kaivinkone liikkui kaivuun aikana nopeasti. Etäisyys mittalaitteeseen oli noin 30 m ja mittaustuloksen viive noin 1-2 s. Tässä menetelmässä kokeen mittaussnopeus ei vaikuttanut olevan oleellinen tekijä, koska kauha pysäytetään mittauksen ajaksi. Prismen haku osoittamalla koneen paikka kartalta ei vielä toiminut koordinaattien käännöksen takia. Ohjelmaan tarvittaisiin lisäksi hakutoiminnon ohjaus mallin korkeuden perusteella. Mittauksen aloittamis- ja lopettamistoiminnot kuljettajan tekemänä toimivat hyvin. Kahden koneen ohjaus yhdellä takymetrillä vuorotellen samoin kuin mittaryhmän ja koneen yhteiskäyttö osoittautuivat myös periaatteessa toimivaksi.

Työkoneen kuljettajan kommenttina oli että "ohjaava järjestelmä hyvin tarpeellinen, koska mittamiehistä on aina pulaa työmailla". Havaintona oli että noin 6" näyttö koneessa riittäisi käytännössä. Kuljettaja pystyy käytännössä asentamaan prisman/kaivuvarren silmämääräisesti suoraan. Havaittiin, että mittaus

kannattanee tehdä jatkossa kauhahan pohja maata vasten. Lopputuloksen tarkkuustestaus tässä vaiheessa ja huonoissa olosuhteissa saattoi olla epäluotettavaa, mutta ainakin tarkkuusmittauksen tulos oli hyvä. Toiminnallinen luotavuus on erityisen tärkeää. Myös tarkemittaus toiminto on jatkossa kehitettäviä ominaisuuksia. RTK/GPS-mittauksen hyödyntäminen kaivukoneen ohjausjärjestelmässä koneen paikantamisessa ja asennon mittauksessa on todennäköisesti käytännössä toimivampi mittausmenetelmä kuin takymetrimittaus.

4.2.8 Asfaltinlevitin

Asfaltinlevittimen työketjuun kuuluvat aloittavat työt, asfaltin vastaanotto, asfaltin levitys ja esitiivistys sekä lopettavat työt. Asfalttikerros on tierakenteen lopullinen pinta, jolloin sen geometrinen tarkkuus (tasaisuus) on oleellista. Materiaalin hinta on korkea, jolloin käytännössä suunniteltua kerrospaksuutta ei ylitetä. Tällöin alemman kerroksen geometriset poikkeamat siirtyvät lähes suoraan lopullisen rakenteen pintaan. Työmenetelmään kuuluu muitakin koneita (asfalttiasema, kuorma-autot, jyrät), jotka toimivat työn kokonaisketjun mukaisesti vaiheistetussa keskinäisessä vuorovaikutuksessa ja riippuvuudessa toistensa kanssa. Asfaltinlevittimen ohjaustehtäviin kuuluvat pinnan korkeus, kaltevuus, tasaisuus ja tiiveys. Materiaalin lämpötilan hallinta ja sen mukainen tiivistäminen on työmenetelmässä myös erittäin oleellista.

Asfalttimassa levitetään asfaltinlevittimellä, joka liikkuu joko telaketjuilla tai pyörillä. Asfalttipäällysteen alustaan pitää olla oikeassa korkeudessa, oikean muotoinen, kantava ja riittävän tasainen. Asfalttimassaa joudutaan kuljettamaan jopa kymmeniä kilometrejä ennen levittämistä ja tiivistämistä. Massan säilyminen lajittumatta ja sopivassa levityslämpötilassa (+115...+185 °C) on oleellista, mikä pyritään varmistamaan käyttämällä pyöreitä siiloja asfalttiasemalla ja kuljetuslavoja kuorma-autoissa. Asfalttimassa puretaan levitinkoneen vastaanottosuppiloon levitystyön aikana. Massa siirtyy kuljettimilla sivusiirtoruuveille ja edelleen massan annosteluluukuille. Asfalttikoneen peräosa on nivelöity vetoaisalla koneen runkoon levitettävän kerroksen paksuuden ja sivukaltevuuden säätöä varten. Peräosaan kuuluu myös tiivistyslaite, jolla massa esitiivistetään. Ajolinjan ohjaukseen käytetään yleensä maahan vedettyä ohjauslankaa tai maalimerkkejä.

Asfaltinlevitinkoneen työn aikaisia ohjaustarpeita ovat materiaalikerroksen paksuuden, poikkitaiprofiilin ja leveyden säätö. Työn dokumentointitietoina ovat tärkeitä tallennettavia tietoja levitetyn asfalttimassan lämpötila, tilavuus, toteutunut kerrospaksuus, kaltevuus- ja korkeuspoikkeamat suunnitelmaan verrattuna. Asfaltinlevittimissä käytetään tyypillisesti kaltevuusantureilla poikkitaiprofiilin säätöön ja "ohjaussuksea" tien pituussuuntaisen profiilin säätöön. Myös joitakin asfaltinlevittimen 3D-ohjausjärjestelmiä (Trimble, Wirtgen, Leica) on kehitetty. Wirtgen on kehittänyt täysin automatisoitua asfaltinlevitintä.

Asfaltinlevittimen työmaatestien päävaiheet olivat kohteen lähtötietojen mittaaminen, koneohjausmallien suunnittelu ja työkonetta ohjaus mallin perusteella. Aluksi tutustuttiin kohteeseen ja tehtiin mittauksia paikallisen koordinaatiston perustamiseksi. Paikallinen koordinaatisto perustettiin mittaamalla kaksi tunnettua pistettä tielinjalta, joihin muut mittaustiedot sidotaan. Koekohteen pintamalli mitattiin robottitakymetrillä.



Kuva 30. Asfaltinlevittimen ohjausjärjestelmän käyttöliittymä kehitysvaiheessa (Roadsys Oy).

Ensimmäisen koekohteen pinta-ala olo noin 50x5 m. Mitta-aineisto siirrettiin Terra-ohjelmiin, jossa maanpinta mallinnettiin ja mallin päälle suunniteltiin kone-ohjausmalli. Mallin suunnittelua edelsi kohteen vaaka- ja pystygeometrialinjojen sekä tasauksen ja poikkileikkauksen suunnittelu. Ensimmäiseksi koemalliksi tehtiin suora tie, jossa oli 2,5 m kaistat, harja keskellä ja 3 % kallistukset sivuille. Tiesuunnitelmasta muodostettiin koneohjausmalli, joka sisälsi 2D-linjat kohteen keski- ja reunalinjoista sekä tierakenteen pintaa kuvaavan kolmioidun 3D-pinnan. Edelleen koneohjausmalli muutettiin linux-muotoon ja siirrettiin ohjaustietokoneelle. ATS-takymetri orientoitiin paikalliseen koordinaatistoon ja prisma kiinnitettiin levittimen perään vasempaan reunaan, prisman korkeus mitattiin ja tallennettiin ohjausjärjestelmän lähtöarvoksi.

Kokonaisjärjestelmän testaus aloitettiin käynnistämällä aluksi järjestelmän ajoneuvotietokoneelle työmaaparakissa. Alun ongelmien havaittiin johtuvan noin 2,5 m virheellisestä prisma-korkeudesta järjestelmässä. Ongelma poistui koneen uudelleen käynnistämisen jälkeen, kun oikean prismakorkeus tuli käyttöön. Kun järjestelmän esitestaus oli tehty, ohjaustietokone ja radiomodeemi asennettiin levittimeen ja kytkettiin työkoneen virtalähteeseen. Järjestelmän asennettiin koneeseen ja jo ensi testauksella järjestelmä näytti tulostavan pääosin oikeita arvoja näytölle.

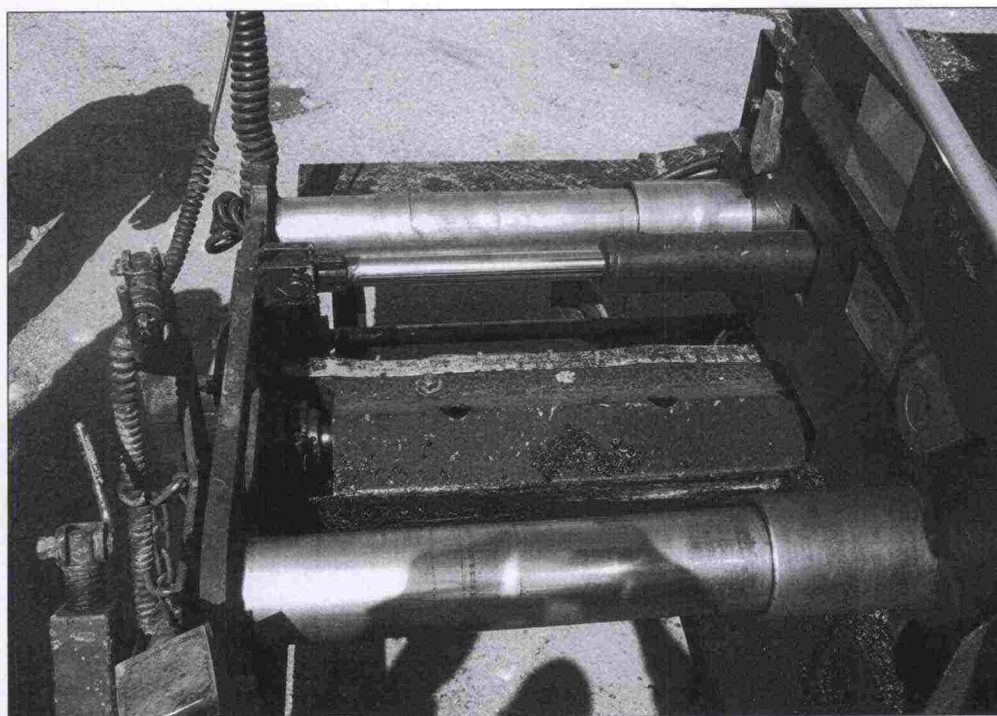
Skanska Asfaltin koneeseen oli tehty testausta varten prismamaston kiinnityspaikka levittimen perään. Prisman kiinnitysmastona käytettiin noin 4 m putkea jolla prisma saadaan riittävän ylös näkymien varmistamiseksi mittalaitteelle. Lisäksi levittimeen järjestettiin virtalähde prismalle ja radiomodeemille ja sateelta ja auringolta suojaava kiinnitysalusta ajoneuvotietokoneelle.

Asfaltinlevittimen perän korkeuspoikkeama voitiin havaita näytöltä sekä graafisena poikkeamana mallista että myös numeroarvona. Kokeen aikana todettiin, että sekä graafista että numeerista ohjausta voidaan hyödyntää levittimen perän ohjauksessa. Parannustarpeena havaittiin suurempi fonttikoko ja yksinkertaiset

graafiset kuvat. Myös sivusiirron ohjaus toimi sekä graafisesti että numeerisesti. Numeerisen arvon etumerkkinä käytetään miinusta (-) kun kone on oikealla puolen seurattavaa linjaa ja plussaa (+) kun ollaan vasemmalla puolen linjaa. Mallin sivukaltevuuden näyttö päätettiin muuttaa kuljettajalle ymmärrettävämmäksi prosenttinäytöksi. Levittimen perän todellisen kallistuksen mittausta huomattiin tarpeelliseksi lisättäväksi toiminnoksi. Todettiin, että seuraavaan vaiheeseen tarvitaan lisäksi CAN-väylällä tietokoneeseen liitetty perän kaltevuuden mittausta, mitä voidaan verrata mallista saatavaan sivukallistusarvoon. Lisäksi havaittiin, että paalulukema näkyi ohjausjärjestelmän näytössä ja muuttui oikein koneen liikkeessä linjaa pitkin.

Aluksi järjestelmään tottuminen vaati kuljettajalta muutaman harjoitusvedon, ennen kuin hän oppi ymmärtämään miten järjestelmää hyödynnetään. Testin loppuvaiheessa kone pysyi jo hyvin linjassa. Mallin korkeussäätö toimi ajon aikana molempiin suuntiin tietokoneen kiertosäädintä kääntäen. Järjestelmän käyttöä helpottaa, jos siihen lisätään informatiivisia ilmoituksia toiminnoista kuten "takymetrimittaus toimii", "kone ei mallin päällä", "prisma hukassa", jne. Kokonaisuutena asfaltinlevittimen ohjausjärjestelmä toimi suunnitellusti ja samalla saatiin lisää näkemystä 3D-ohjauksen hyödyntämismahdollisuuksista asfaltinlevitysprosessissa.

Asfaltinlevittimen ohjausjärjestelmän seuraavaa kehitysversiota testattiin työmaakokeissa kevyen liikenteen katupäällystyskohteessa Pieksämäen kaupungissa Skanska Asfaltin ja Oulun yliopiston yhteistyönä. Ohjausjärjestelmän käyttöliittymää oli kehitetty ja lisätty yksi CAN-väylään liitetty kaltevuusanturi levittimen perän kaltevuuden reaaliaikaiseen mittaukseen. Parannusten jälkeen levittimen perämiehellä oli mahdollisuus verrata todellista kaltevuutta mallin kaltevuustietoon ja ohjata perää sen mukaan. Myös järjestelmän ohjelmistoa oli kehitetty toiminnoiltaan yksinkertaisempaan ja selkeämpään suuntaan.



Kuva 31. Asfaltinlevittimen perän "zoomi", jolla säädetään levitettävän kerroksen leveys.

Ohjausperiaatteena oli, että perän toisen reunan korkeutta mitataan robottitaky-metrillä ja samanaikaisesti luetaan kaltevuustietoa kaltevuusanturilta. Näitä tie-toja koneohjausmalliin vertaamalla voidaan levittimen perämiehelle antaa sekä graafiset että numeeriset ohjeet perän säätämiseksi suunnitelmamallin mukaan. Koneen käyttäjille levittimen perän säätäminen edellyttää, että asfalttimassan päällä kelluvan perän asentoa ja korkoa säädetään koneen liikkeen aikana, jotta pintaan ei tule epätasaisuuksia. Venttiilien ja sylinterien säätäminen auto-maattisesti on myös mahdollista, mutta se edellyttää lisää anturointia ja samalla venttiilien ohjaamiseen erillisen säätöjärjestelmän.

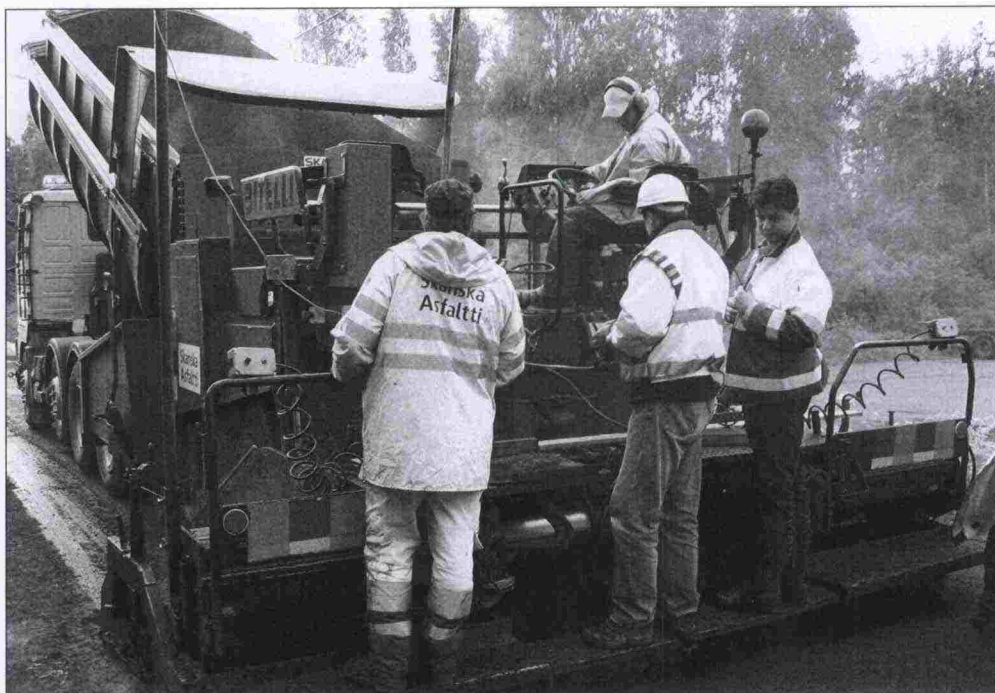
Testauskohteena oli noin 200 m pitkä, epätasaisia painumia ja pintavaurioita käsittänyt pyörätie. Korjaussuunnitelma sisälsi painumien tasauksen sekä pin-noituksen sekä 65 kg/m^2 (3 cm) päällystekerroksen. Lähtötilanteen kartoitus aloitettiin mittaamalla koealueen pintamalli. Lähtötiedoiksi mitattiin robottitaky-metrillä pyörätien päällysteen reuna- ja keskilinja sekä liittymät. Ennen mittausta perustettiin koordinaatisto ja rakennettiin takymetrin orientointia varten kolme kiintopistettä, joista kahta käytettiin orientointiin, yksi piste oli varalla. Mitattu aineisto siirrettiin Terra-ohjelmiin, jossa mittauspisteistä muodostettiin 3D-pintamalli (kolmioverkko) sekä reunalinjat. Tasoitustyön ohjaukseen käytettiin reunakäyrien mukaan tehtyä tasoitettua pintaa, selvästi poikkeavia pisteitä ei otettu ohjauskäyriin mukaan. Koneohjausmalli tulostettiin ja siirrettiin ohjaustieto-koneella. Ohjausjärjestelmää testattiin ennen varsinaista tasaustyötä noin 3 tuntia pakettiautoon asennetun prisman avulla koekohteessa. Samalla käyttöliit-tymää kehitettiin paremmaksi. Asfaltinlevittimen perään asennettiin prismatanko, kaltevuusanturi sekä tietokoneen ohjausyksikkö. Eri osien välillä toimi CAN-väylätietoliikenne sekä radioyhteys koneohjaustakymetrin ja ohjausyksikön välillä.



Kuva 32.
Asfaltinlevittimen 3D-ohjaus-järjestelmän kehittävää tes-tausta Pieksämäen kaupun-gin kevyenliikenteen väylän parantamiskohteessa kesäl-lä 2004. Käyttöliittymää kehi-tettiin reaaliaikaisesti kuljet-tajien palautteen perusteella.

Aluksi korjausmenetelmässä tavoitteena oli täyttää painumat ja kolot ja sitten tehdä tasainen pintakerros. Painumien täyttäminen asfaltilla tehtiin ohjausjärjestelmää hyödyntäen siten, että koneohjausmallin korkeutta säädettiin 20 mm alaspäin ensimmäisen ajon aikana. Sää muuttui hyvin sateiseksi tasauksen aikana, jonka vuoksi työssä pidettiin tauko levityskertojen välillä. Varsinaisen pintakerroksen levitykseen pintamallin korkeussäätöarvo asetettiin nollassa. Levitystyön aikana perämies saattoi seurata perän tavoitekorkeutta ja kaltevuutta sekä graafisesti että näyttöön tulostuvien numeroarvojen perusteella. Levityksen aikana paikannus ja kaltevuusmittaus toimivat ja perämies näki näytöstä reaaliaikaisesti korkeuspoikkeaman, kaltevuuden ja sivusiirtymän. Perämies säätöi mallin mukaan perän kaltevuutta ja korkeutta. Kuljettaja ajoi tien keskilinjaa ja perämies säätöi levitys-zoomeja ajolinjaohjeen mukaan. Korjauskohteen viimeisellä 50 m matkalla kokeiltiin testausmielessä pelkästään sivukaltevuuden ohjausta +2 % mukaan. Lopuksi tehtiin tiivistetyn päällystekerroksen tarkemittaus takymetrillä.

Asfaltinlevittimen ohjausjärjestelmä toimi suunnitellulla tavalla. Perämiehen työskentely malliohjauksen avulla vaikutti toimivalta ja hyödylliseltä. Perämies pystyi jatkuvasti vertaamaan ohjausjärjestelmän näytöltä koneen perän kaltevuutta ja korkeutta suunnitelmamallin ohjeeseen. Perämies ohjasi sivuzoomien avulla asfaltin reunan mallin reunalinjan mukaan. Kuljettaja ohjasi työkonetta tielinjalla keskimäärin oikeaa linjaa eteenpäin. Näyttöyksikkö oli riittävän kirkas näkymään myös auringonvalossa. Käyttöliittymässä poikkileikkausnäyttö vaikutti käyttökelpoisimmalta perämiehen työskentelyn avustamisessa. Mallien mittaus kohteessa onnistui hyvin. Harjaantuminen nopeuttaa työtä edelleen. Mallin suunnittelu työmaalla on järjestelmän vaativin työvaihe. Mallinnus on mahdollista, mutta vaatii suunnittelijalta osaamista mittauksista, rakenteen parantamisesta ja suunnittelu-CAD ohjelmien käytöstä.



Kuva 33. Robottitakymetri paikantaa kokeessa 6 kertaa sekunnissa asfaltinlevittintä. Levittimen perän ohjauksessa käytetään 3D-CAD-mallia sekä graafista päätettä, jonka avulla perämies ohjaa työstettävän päällystykseen korkeutta ja sivulinjoja.

Tierakenteen parantamisen koneohjausmallit ovat kohdekohtaisia, tien luokasta ja laatuvaatimuksista riippuen mallinnuksen ja korjaussuunnittelun vaativuus vaihtelee. Seuraavaksi tarvitaan kokemusta vaativimpien kohteiden korjaussuunnittelusta. Tehdyn tarkemittauksen tuloksen perusteella levitetty pinta oli pääosin 0- 20 mm tarkkuudella mallin mukainen. On perusteltua olettaa, että tasaisemmalla tiellä ohjauksen tarkkuutta voidaan tästä vielä parantaa. Jatkossa on tekniset valmiudet kehittää myös levittimen perän automaattinen ohjaus. Levittimen perän automaattinen korkeus- ja kaltevuussäätö on mahdollista tehdä kahta koneen sivuilla olevaa sylinteriä ohjaamalla. Tällöin koneen etummaisilla sylintereillä säädetään perän kaltevuutta ja takimmaisilla nostetaan ja lasketaan levittimen perää.



Kuva 34. Asfaltinlevittimen 3D-ohjausjärjestelmän testaus Pieksämäen kaupungin kevyenliikenteen väylän parantamiskohteessa kesällä 2004. Paikannuslaitteena käytettiin taustalla näkyvää Oulun yliopiston robotitakymetriä.

Koesarjan jälkeen pohdittiin mahdollisuuksia kehittää toimiva työkalu parantamiskohteen lähtötietojen mittauksiin. Yhtenä ajatuksena esitettiin automittaus, jossa takymetrin prisma kiinnitetään autoon, prismaa mitataan takymetrillä ja mittausdata siirretään langattomasti suoraan mittausautossa olevalle tietokoneelle. Tämä olisi ehkä riittävä lähtötietojen mittausmenetelmä pienehköissä korjauskohteissa. Samaa menetelmää voidaan soveltaa myös laatutietojen mittauksiin. Käytännössä esimerkiksi asfalttiryhmän työnjohtaja, jolla on osaaamista sekä mittauksista että suunnittelusta, voisi käydä kartoittamassa uudet kohteet etukäteen ja tehdä kulloinkin optimaalisen koneohjausmallin. Seuraavana koekohteena tavoitellaan vaativampaa korjauskohdetta, jossa on tarpeen tehdä sekä vaaka- että pystygeometrian muutoksia. Tällöin koneohjausmallin suunnittelun vaikeusaste kasvaa ja saadaan kokemusta järjestelmään tarvitta-

vista parannuksista. Kokonaisjärjestelmän soveltaminen esimerkiksi siltojen lähestymisalueiden korjaukseen saattaa olla hyvä sovelluskohde 3D-ohjausjärjestelmälle. Jatkokehitysmahdollisuudet ja tarpeet ovat monenlaisia. Yhtenä suunnitteluprosessiin liittyvänä työkaluna TerraStreet -ohjelman kehittäminen rakenteen parantamisen geometrian suunnitteluun nykyistä vielä paremmin soveltuvaksi. Muina kehitystarpeina havaittiin levittimellä tehdyn työn pinta-alamittaus ja tietojen tallennus koneohjausjärjestelmää hyödyntäen, langattoman tiedonsiirron käyttöönotto laatutietojen dokumentoinnissa ja mallien siirrossa, levitetävän asfalttimassan lämpötilamittauksen kytkentä ohjausjärjestelmään ja yksittäisen kuorman levityskohdan sijaintitiedon tallentaminen.

4.2.9 Tiivistyskone

Tiivistyskonetta käytetään kaikkien tien päällysrakennekerrosten tiivistämiseen. Maalajin rakeisuus määrää tiivistettävän maakerroksen työstöpaksuuden ja ratkaisee myös jyrän koon ja laadun. Karkearakeiset maalajit tiivistyvät vähemmällä työmäärällä kuin hienorakeiset maalajit. Kiviaineksen oikean muotoisella rakeisuuskäyrällä ja oikealla vesipitoisuudella on tärkeä merkitys tiivistymiseen ja edelleen kantavuuteen. Tien seuraavaa rakennekerrosta ei saa tehdä ennen kuin edellinen täyttää tiiveys- ja kantavuusvaatimukset.



Kuva 35. Tiivistyskoneeseen asennettu 3D-ohjausjärjestelmä (Wirtgen Group) työmaakokeissa Vartiuksessa 2004.

Tien päällysteen rakentamisessa tiivistämisellä pyritään vähentämään asfaltti-päällysteen kiviaineksen välisen tyhjätilan määrää. Tiivistämisessä kiinteät partikkelit järjestyvät ja pakkaantuvat tiiviimpään ja tehokkaampaan asentoon ja järjestykseen. Päällystämisprosessin laatu vaikuttaa päällysteen kulutuskestävyyteen, tasaisuuteen ja edelleen liikenteen välityskykyyn. Huonosti tiivistetty päällystekerros on altis halkeilemaan, voi aiheuttaa onnettomuuksia, on epämiellyttävä ajaa ja voi myös nopeammin johtaa koko päällystekerroksen vaurioitumiseen käyttökelvottomaksi.

Päällystystyössä asfalttia kuljetetaan kuorma-autoilla asfalttiasemalta työmaalle ja levitetään asfaltinlevitinkoneella sopivassa levityslämpötilassa (+115...+185 C°). Alustan tulee olla oikean muotoinen ja oikeassa korkeudessa sekä riittävän kantava ja tasainen. Jos alustana on vanha päällyste, epätasaisuudet tasataan joko jyräsimillä tai tasausmassalla. Asfaltinlevitintä seuraa yksi tai useampia tiivistyskoneita. Asfalttipäällysteiden tiivistäminen jaetaan neljään vaiheeseen: aloitusjyräys, esijyräys, tiivistysjyräys ja jälkijyräys. Tiivistämisjyräys on lopetettava kun massan lämpötila laskee +60...+70 C°.

Tiivistyskoneina käytetään yleensä 7-12 tonnin valssijyriä tai kumipyöräyjyriä. Kumipyöräijyrän käyttöä hiekan ja soran tiivistämiseen tietyömaalla suositellaan sen tehokkuuden vuoksi. Dynaamisten tiivistyskoneiden täryn frekvenssiä ja amplitudia voidaan säätää rakenteen ja tehtävän mukaan. Eri jyräysvaiheet tehdään nykyään yleensä samalla kalustolla.

Sitomattomissa päällysrakennekerrosten tiivistämisen työmenetelmänä on esitiivistää rakennekerros heti materiaalikerroksen levityksen jälkeen ja tehdä lopullinen tiivistystyö tiehöylän viimeistelytasauksen jälkeen. Tierakenteiden tiivistymistä jyräyksen jälkeen mitataan työmaalla radiometrisellä tiheydenmittauksella. Mittausmenetelmä soveltuu hyvin tiivistystyön ohjaukseen kun laite on säännöllisesti kalibroitu. On myös huomioitava että, ainetta rikkomattomilla mittausmenetelmillä on mahdollista mitata vain kerroksen suhteellinen tiiviysarvo. Absoluuttisen tiiveyden mittaukseen niistä ei saada luotettavaa tulosta.

Materiaaliominaisuuksien ja alustan laadun lisäksi optimitiiveyden saavuttamiseksi oleellista on sopiva jyräyskerrosten määrä ja materiaalikerroksen paksuus. Liiallinen jyräminen voi aiheuttaa heikon kiviaineksen murskaantumista, joka voi materiaalin ominaisuuksien huonontumiseen ja jopa routimiseen. Samaan lopputulokseen päädytään jos liikenne päästetään tiivistämään rakennekerros epätasaisesti. Optimaalinen tiivistysaste voidaan saavuttaa oikealla jyräyskerrosten määrällä, mikä riippuu materiaalin ominaisuuksista. Tietyn jyrän yliajokertojen optimimäärä valitulle tien rakennekerrokselle ja materiaalille voidaan määrittää tarkasti koejyräyksen ja tiheysmittauksen perusteella.

Tiehankkeen alkaessa urakoitsija tekee tyypillisesti testin, jossa kullekin tiivistyskoneelle määritetään vaadittavaan tiiveyteen tarvittava yliajokertojen määrä. Kun asfalttikerroksen tiivistymiseen vaikuttavat seikat kuten valssin paino, täryn frekvenssi ja tiivistyskoneen ajonopeus pysyvät samoina, kerroksen tiivistyminen riippuu yliajokertojen määrästä. Jos yliajokertoja tehdään liian vähän, jää rakenteeseen liikaa tyhjätillaa, jolloin rakenteen tiiveys jää riittämättömäksi. Toisaalta jos tiivistämistä tehdään liikaa, kiviaines murskaantuu ja asfalttimassan tai sitomattoman kerroksen ominaisuudet muuttuu. Liiallinen tiivistäminen vähentää tyhjätillan liian pieneksi, mikä voi johtaa päällysteen kantavuuden vähenemiseen ja toisaalta päällyste ei pysty reagoimaan riittävän joustavasti lämpötilan ja kosteuden muutoksiin ja vaurioituu nopeammin.

Tiivistyskoneen ja- työn ohjauksessa on tarpeen kontrolloida jyrän yliajokertojen määrää rakenteen poikkileikkauspisteen yli. Yliajokertojen määrän valvonta ja tarkkailu ihmisen toimesta käytännössä työmaalla on hankalaa ja epäluotettavaa. USA:ssa tehdyn tutkimusjakson tulosten perusteella (A. Oloufa, 2002) huomattiin että tien kaistan reuna- ja taitekohdat jäävät selvästi vähemmälle tiivistykselle kuin kaistan keskikohta. Jotta jyrän tiivistämistyötä voidaan suunnit-

telmaan perustuen ohjata yhtä paljon koko tien poikkileikkaukselle, on tunnettava koneen reaaliaikainen tarkka kulkureitti. Jatkuva paikan mittaus voidaan tehdä joko GPS- tai takymetrimittauksilla.

Asfaltin tiivistämisessä tarvitaan useita jyrä, minkä vuoksi järjestelmän täytyy monitoroida kaikkien levittimen kanssa toimivien jyräliikkeitä, yhdistää tiedot ja lähettää reaaliaikainen tieto yliajokertojen määrästä kaikille koneille. Ohjaus on mahdollista, jos jokaiseen tiivistyskoneeseen asennetaan yksinkertainen tietokone, johon on liitetty GPS-vastaanotin. Kiinteästi sijoitetut GPS-tukiasema sekä ohjaustietokone voisivat kerätä työkoneiden langattomasti ja reaaliaikaisesti lähettämän paikkatiedon ja lähettää sen edelleen takaisin koneisiin. Tällä kokoonpanolla työkoneisiin ei tarvitsisi asentaa kalliita tietokoneita, vaan työkoneen yksikkö on lähinnä tiedon välittäjä. Järjestelmä mahdollistaisi myös työn aikaisen dokumentointitiedon keräämisen rekisteriin tienpitäjän tarpeisiin. Kehitettyä ohjelmistoa voitaisiin käyttää yliajokertojen määrän havainnollistamiseen työkoneen käyttöliittymässä eri väreillä. Ohjausmenetelmä perustuu oikean yliajokertojen määrän määrittämiseen ennen tiivistämistyötä rakenteen materiaaliominaisuuksista ja koejyryyksessä tehdyistä tiheysmittauksista.

4.2.10 Lyöntipaalutuskone

Lyöntipaalutuskoneissa ja -työmenetelmissä nähdään selviä tarpeita ja potentiaalia automaattisten ohjaus- ja tarkastusmenetelmien kehittämiseksi. Varsinaisessa käytännön paalutustyössä sorakerrokset, joiden läpi lyödään, edellyttävät ennakkointia ja liukumavaroja vinoja paaluja lyötäessä. Paalujen lopullinen sijainti tarkistetaan usein takymetrillä. Paalun asento on usein vaikea mitata. Mahdollisesti "asento" voitaisiin mitata jo lyönnin aikana. Nykyisillä paalutusmenetelmillä on vaikea tai mahdotonta saada luotettavaa tietoa paalutustyön onnistumisesta. Paalun painumaa mitataan vaihtelevilla menetelmillä, usein manuaalisesti ja silmämääräisesti (apumies seuraa paalun tunkeumaa). Paalun lähtölyöntiaseman keskimääräinen toleranssi on ± 20 mm, loppuasennon toleranssi ± 100 mm, joskus huonosti "osuneet" paalut vaihdetaan ja lyödään uudestaan. Isoon kiveen osuessaan paalu kääntyy väkisin eri kulmaan, jolloin koneenkäyttäjän on käännettävä puomia paalun mukaan rikkoontumisen estämiseksi. Paalutustöissä mitoitusvarmuudet ovat suuria, varmuuskerroin yleensä >5 . Koheesiopaalutuksessa koheesio mobilisoituu vasta 1-2 kk kuluessa, heti kantavuutta ei voida määrittää. Lyöntipaalutuksen automaattisen ohjauksen kehittämiseksi oleellista olisi mitata paalujärkäleen nopeus juuri ennen iskua (järkäleen pudotuskorkeus vaihtelee 200..1500 mm). Jotkut konevalmistajat ovat jo kokeilleet paalutustöissä GPS-paikannusta.

Lyöntipaalutuksen työketjuun kuuluvat aloittavat työt, paalun kiinnitys, paalun nosto, asettaminen ja suuntaus, paalun lyönnit, loppulyönnit ja lopettavat työt. Lyöntipaalutuksen automatisointitehtävät, -mahdollisuudet ja -potentiaalit ovat periaatteessa hyvin laajat ja monitahoiset. Paalujen lopullinen 3D-sijainti- ja asento ovat loppukantavuuden ohella oleellisia. Paaluja tulisi lyödä siten, etteivät ne rikkoonnu, lyöntikohtainen tunkema ja lyöntitehokkuus olisi mahdollisimman hyvä ja niiden lopullinen kantavuus saadaan määrittää. Paaluja lyötäessä syntyvän ympäristöä häiritsevän melun ja tärinän määrää tulisi myös voida vähentää. Koneen mahdollista kaatumista tulisi myös varoa ja ennaltaehkäistä.

Lyöntipaalutuskoneen aiheuttama tärinä on tyypillisesti voimakasta ja se on otettava mm. erilaisten antureiden sijoittelussa huomioon. Lyöntipaalutuskoneiden kokonaisvaltainen automaation edellyttää nykyistä tarkempia pohjatutkimuksia. Robottitakymetrin paikannustarkkuus ± 3 mm riittää paalutustyöhön hyvin. Kentän tilanne paalutuksen toimintaprosessissa arvioidaan nykyisin hyvin kirjavaksi. Suunnittelussa ja työmaalla käytetään lukuisia erilaisia CAD-ohjelmia ja -sovelluksia, formaatteja, laitteita ja järjestelmiä sekä mittausmenetelmiä. Reaaliaikaisessa suunnittelussa ja mittauksessa suunnittelija voi saada mittaus tulokset suoraan omaan CAD-sovellukseensa. Toisaalta myös mittauksessa voidaan hyödyntää suunnitelmatietoa. Käytännössä esimerkiksi paalun katkaisuluvan antaminen voi olla hidasta. Vastuu luvan antamisesta on aina geotekniikolla.



Kuva 36. Teräsbetonipaalujen lyöntipaalutus käynnissä Valtatie 4 -rakennustyömaalla Oulussa 2002.

Paalutustyön kehittämisen suurimmaksi ongelmaksi on arvioitu "näin on tehty ennenkin". Pora- ja lyöntipaalutuskoneet ovat hyvin erilaisia. Tarvittaisiin uudet tuotannonohjausmallit. Käytännössä eri geoteknikoiden tekemät suunnitelmat ovat kaikki erilaisia. Myös paalujen mitoitus on käytännössä ongelmallista. Paperilla olevat suunnitelmapiirroksat poikkeavat usein sähköisistä suunnitelmadokumenteista. Paalutuskoneiden kuljettajat ovat yleensä vanhempia miehiä, joille uuden tekniikan hyödyntämien voi olla kynnyskysymys. Paalutustöitä suunniteltaessa olisi tiedettävä etukäteen, kuinka pitkiä paaluja kulloinkin tarvitaan. Paalujen rikkoontumisvaara vaihtelee pohjaolosuhteiden mukaan ja on joskus hyvinkin suuri.

Koneenkuljettaja tarvitsee työn tekemiseen lähtötiedoiksi paalukartan, paalunumeron ja paalumitan. Lyötävän paalun tiedot tulisi rekisteröityä automaattisesti. Käyttöliittymän tulee olla yksinkertainen ja helppokäyttöinen. Langattoman työmaan tietojärjestelmän avulla toimistossa voitaisiin seurata näytöllä paalun tunkeumia reaaliajassa. Paalutuskoneen anturit tulisi tulevaisuudessa kytkeä suoraan automaattiseen prosessiin, joka tulostaa lopputulokseksi paalutuspöytä-

kirjat. Monien eri käyttäjien tarpeita ajatellen kaikki mahdolliset tiedot tulisi tallentaa myöhempää käyttöä ja hyödyntämistä varten. Jokainen lyöty paalupiste muodostaa myös tavallaan uuden pohjatutkimuspisteen tuloksineen. Siten paalutustyössä voitaisiin periaatteessa tulevaisuudessa koko ajan työn edetessä hyödyntää paalukohtaisesti tarkentuvaa pohjatutkimuskarttaa.

Eri maalajit on käytännössä lyötävä aina eri tavoin. Paalun mahdollinen poikkimeneminen havaitaan lyötäessä kun lyöntiääni ja tunkeuma muuttuvat erilaisiksi. Teräsputkien paalutustyö poikkeaa myös oleellisesti teräsbetonipaalujen paalutustyöstä. Kymmenen loppulyönnin sarjoilla havaitaan onko riittävä kantavuus saavutettu. Loppulyönnit voitaisiin suorittaa automaattisesti. Kallioon lyötäessä käytetään kalliokärkiä, ja kärkeä lyödään varovasti kallion sisään jonkin verran. Käytännössä paalutustyössä vasaran rekyyli on ongelma. Nykyisin joudutaan odottamaan pomppimisen loppumista. Automaattinen ohjausjärjestelmä voisi nostaa paalun heti ensimmäisestä pompusta ylös.

4.2.11 Kallioporakoneet

Louhinnassa kallio irrotetaan räjähdysaineiden avulla, jotka sijoitetaan kallioon porattuihin poranreikiin. Maanpäällisessä avolouhinnassa käytetään nykyään hydraulisia porausvaunuja. Poravaunu muodostuu tela-alustaisesta vaunusta ja siihen kiinnitetystä hydraulisesti toimivasta puomista ja syöttölaitteita. Avolouhinnassa puomit ovat kiinteitä, teleskooppipuomeja ja nivelpuomeja. Räjäytystä varten laaditaan aina kirjallinen räjäytyssuunnitelma, joka sisältää tiedot porauksista ja räjähdysaineisiin sekä suojaamiseen liittyvät tiedot. Avolouhinnassa reiät porataan yleensä vinoon (5:1-2:1), mikä helpottaa kallion irtoamista pohjasta.

Porauslaitteiden automatisoidun ohjauksen kehittämisen yhtenä lähtökohtana tulisi olla poraustietojen generointi poraussuunnitelmista. Räjäytystöissä yleisperiaatteena on, että kaikki tekemiset tulee dokumentoida ja vastuut olla selvillä mahdollisimman täydellisesti. Automatisoinnin tavoitteena on kytkeä porauslaitteet osaksi kokonaistoimintaprosessia, mikä koostuu reaaliaikaisesta tuotantotietojen seurannasta, tuotannon ohjauksesta porauskaavioiden perusteella sekä dokumentoinnin ja raportoinnin kehittämisestä. Tähän liittyen olisi kehitettävä myös kallio- ja tunneliprofiilien mittausta, porauskaluston automaattisesti ohjattuja toimintoja ja paikannusmenetelmiä sekä maan alla ja päällä.

Kallioporaus koneiden työmenetelmien kehitystavoitteina on 3D-suunnitteluun siirtyminen, porauskaavioiden generointi suunnitelmista, toteutuman ja suunnitellun vertaus, 3D-visualisointi). Paikannuksessa ja navigoinnissa haasteina on kaluston seuranta, kapasiteettien optimointi, automaattinen koneen paikannus, automaattinen porausreiän paikannus. Etäyhteyksien kehittämisen haasteina ovat mm. tuotannon seuranta, kaluston kunnon seuranta ja edelleen huollon suorittaminen. Yhtenä lisävaikeutena on, että GPS-paikannus ei toimi maan alla. Käytännössä laitteet usein ikään kuin "häviävät" maan alle.

Porauslaitteisiin on nykyisin saatavilla kirjava valikoima ohjausjärjestelmiä. Ongelmana on että, yksittäisten komponenttien saatavuus järjestelmiin on uhattuna. Järjestelmien laajennettavuus on yleisesti huono. Myös järjestelmien ylläpito sitoo paljon resursseja. Pisimmälle on viety maanalainen louhinnan ohjausjärjestelmä, jossa louhetta kuljetetaan automaattisesti (opetusajo, seinämien skan-

naus, autonominen toisto) kuormaajan teleoperoitua kauhan täyttöä lukuun ottamatta. Maanalainen tietoliikenne on kokemusten mukaan vaikeaa toteuttaa riittävän nopeasti ja luotettavasti.

Kalliolouhinnan maailmanlaajuisten päätoimijoiden vuonna 2000 aloittaman IREDES-standardointityön tavoitteena on ollut kehittää tiedonsiirtostandardit louhinta-alan työkonoiden ja kaivosten tuotannonohjausjärjestelmien välille. Kiirunan kaivoksessa vuonna 2002-2003 tehdyssä testausjaksolla kokeiltiin porauskaavioiden sekä määrä ja laatutietojen siirtoa Atlas Copco -kallioporakoneeseen. Tiedonsiirtoa varten kehitettiin IREDES-standardiin perustuva XML-shema. Tunnelisuunnitelman globaalin koordinaatiston muunnos työkoneen sisäiseen koordinaatistoon koneen ohjausjärjestelmässä sovellettavaksi porauskaavioksi oli yksi testauksen kehityskohteita.



*Kuva 37.
Avoulouhosporauksen kokonais-
valtainen automaatio lähtee po-
rauskentän geometriatietojen si-
säänluvusta.*

Kalliolouhinnan porauslaitteisiin on jo nykyisin saatavilla kirjava valikoima ohjausjärjestelmiä. Järjestelmien laajennettavuus on yleisesti rajoitettu ja yksittäisten komponenttien saatavuus on usein uhattuna. Myös järjestelmien ylläpito sitoo paljon resursseja. Sandvik Tamrock Oy:n tuotteistamassa maanalaisen louhinnan ohjausjärjestelmässä (AutoMine) louhetta kuljetetaan automaattisesti kuormaajan teleoperoitua kauhan täyttöä lukuun ottamatta. Järjestelmän perustoimintoja ovat opetusajo, kallioseinämiä skannaus ja opetettujen toimintojen autonominen toisto. Maanalainen tietoliikenne on kokemusten mukaan vaikeaa toteuttaa riittävän nopeasti ja luotettavasti.

Sandvik Tamrock Oy:n ohjausjärjestelmän jatkokehityksen pohjana käytettäväksi standardeiksi on valittu IEC 81131-3, CANOpen sekä QNX (Linux-mahdollisuus). Tietoliikenne ulospäin hoidetaan ethernetillä, SMS- ja GPRS-tekniikoilla. Uuden sukupolven ohjasteknologian kehitystyötä on edelleen jatkettu. Kaikille eri ohjausjärjestelmille on pyritty luomaan yhteisiä ominaisuuksia kuten käyttöliittymän periaatteet, diagnostiikka, hälytykset, etäyhteydet ja turvallisuus-

asiat. Uutta hydraulikkaa (väyläliitetyt komponentit, standardointi) otetaan käyttöön hyötysuhteen parantamiseksi. Myös yritykselle haetaan uusia toimintatapoja suunnittelusääntöjen, valmistettavuuden, ohjelmistotuotannon suhteen.



Kuva 38. Kalliolouheen kuljetusta teleohjatulla pyöräkuormaimella (Sandvik Tamroc Oy).

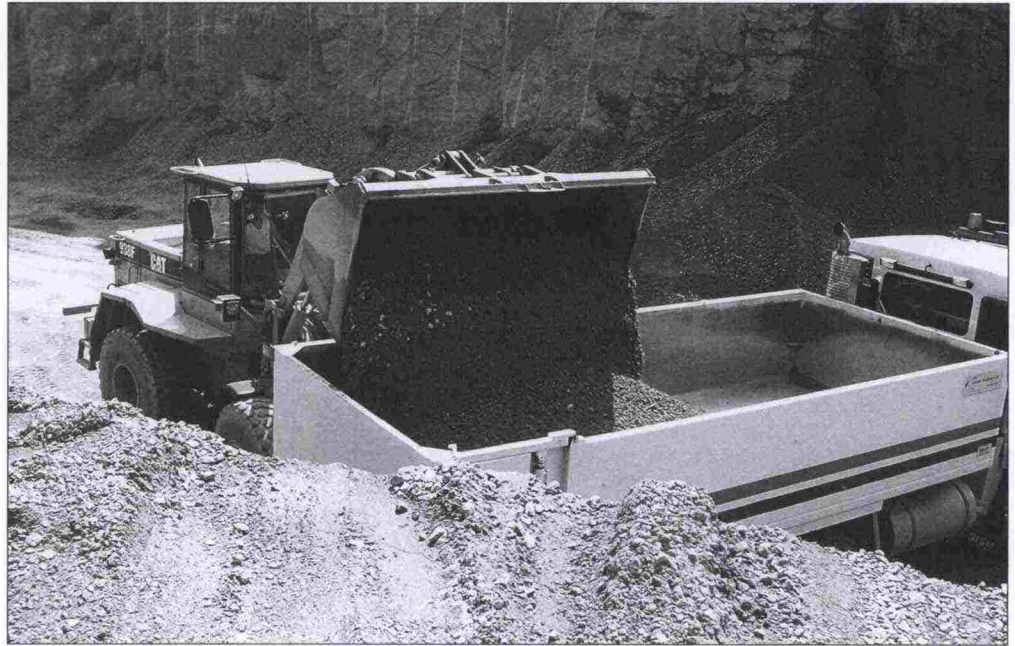
Viime aikoina kaivosteollisuudelta on tullut uusia vaateita kytkeä porauslaitteet sujuvaksi osaksi kokonaistoimintaprosessia. Räjäytystöissä periaatteena on, että kaikki tekemiset pitää dokumentoida ja vastuut olla selvillä mahdollisimman täydellisesti. Periaatteessa poraustiedot tulisi aina voida johtaa tunnelisuunnittelusta. Louhintatyössä kokonaistoimintaprosessin kehitystarpeita nähdään muunmuassa tuotannon ohjauksessa porauskaavioiden suunnittelussa, tunneliprofiilien dokumentoinnissa ja raportoinnissa, porauskaluston automaattisissa toiminnoissa, porausreikien ja porauslaitteen paikoituksessa sekä reaaliaikaisessa tuotanto- ja laatutietojen seurannassa.

Tulevaisuuden haasteet ovat louhinta-alallakin periaatteessa samoja kuin tienrakentamisessakin (3D-suunnitteluun siirtyminen, porauskaavioiden generointi suunnitelmista, toteutuman ja suunnitellun vertaus, 3D-visualisointi). Paikannuksessa ja navigoinnissa haasteina on kaluston seuranta, kapasiteettien optimointi, automaattinen koneen paikannus, automaattinen porausreiän paikannus. Etäyhteyksien kehittämisen haasteina ovat tuotannon seuranta, kaluston kunnon seuranta ja edelleen huollon suorittaminen.

4.3 Materiaalisiirtojen ohjaus

Materiaalisiirtojen ohjauksessa lähtötietona on massansiirtosuunnitelma sekä suunnitelmätietojen ja resurssien perusteella laadittu työmaan työvaihekohtainen työsuunnitelma. Lähtötietoina ovat maa-ainespakat ja varastoalueet sekä niissä olevat materiaalityypit, niiden määrät ja laatutiedot. Toisaalta tunnetaan rakenteisiin tarvittavien materiaalien laatu ja määrätiedot. Ohjaustehtävinä ovat siirtojen reaaliaikainen optimointi, mittaus ja dokumentointi sekä edelleen suorat yhteydet laskutukseen. Työmääräykset työkoneiden ja kuljetuskaluston pääte-

laitteille siirretään langattomasti työmaan palvelimelta toimijoille. Viestien muuttaminen ja päivitys järjestelmässä tulisi olla työnjohdolle joustavaa, koska olosuhteiden odottamattomat muutokset työmaalla edellyttävät usein nopeita muutoksia työsuunnitelmiin maarakentamisessa. Tulevaisuudessa toteutuma- ja laatu-tiedot dokumentoidaan osaltaan työkoneilla ja tiedot siirretään päivittäin työmaan johdon käyttöön. Järjestelmä mahdollistaa työnjohdolle laatu- ja määrätietojen vertailun suunnitelma- ja aikataulutietoihin ja reagoinnin mahdollisiin poikkeamiin.



Kuva 39. Materiaalin kuormaus pyöräkuormaajalla kuorma-autoon. Kuormauksessa suoritetaan materiaalin ja sen paikan tunnistus sekä kuormatun määrän punnitus. Tiedot siirretään langattomasti työmaan palvelimelle, josta työnjohto voi tarkkailla työn edistymistä.

4.4 Aikataulun hallinta

Aikataulunhallinnan esittämiä erilaisia vaateita ja hyötyodotuksia automaatiolle ovat työkoneiden tekemän työn määrän mittaaminen tehtävittäin jatkuvasti, valmiusasteen määrittäminen reaaliaikaisesti, automatisoitujen tehtävien reaaliaikaisen seuranta, projektihallintaan liittyvän tiedonkeruuprosessin helpottaminen, odotusten ja seisokkien minimointi, reaaliaikainen toteutumantiedon tuottaminen työnjohdon käyttöön, työnaikaiset muutos- ja optimointimahdollisuudet (työkoneketjut), toteutumastrendin mukainen valmistumisajankohta tunteminen sekä nopeampi ja joustavampi yllättäviin tilanteisiin reagointi.



Kuva 40. Yllättävä tilanne aiheuttaa tietyömaalla monia seuraamuksia, jotka olisi myös aikataulullisesti hallittava.

4.5 Kustannusten ohjaus

Kustannusten ohjauksessa työmaan kannalta oleellista olisi, että työkokonaisuuksien toteutuneita kustannuksia voidaan määrittää luotettavammin ja niitä voidaan edelleen verrata tavoitebudjettiin. Kehittyneessä automaatiossa työkonien ja materiaalsiirtojen ohjausjärjestelmien hyödyntäminen koko prosessissa mahdollistaa työ- ja materiaalmäärien toteutuman seurannan miltei reaaliajassa. Tiedot on mahdollista tallentaa päivittäin ja mittausjärjestelmistä voidaan luoda suorat yhteydet myös laskutukseen.

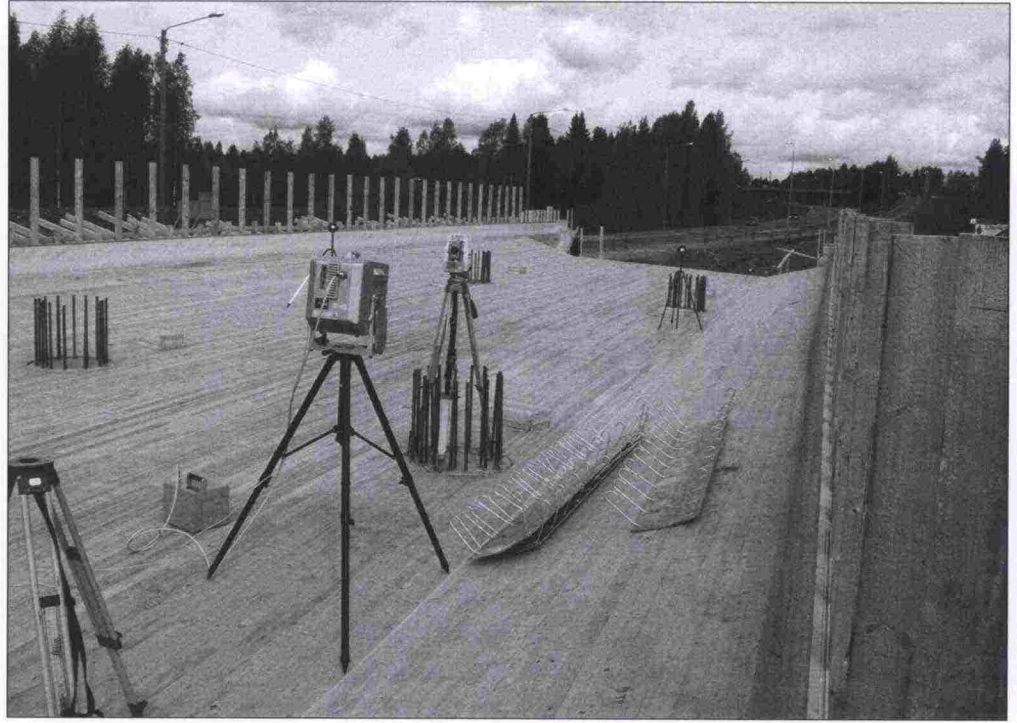
4.6 Aliurakoitsijoinnin hallinta

Suuremmissa tiehankkeissa ja etenkin pidempiaikaisissa suunnittele ja rakenna-toimeksiannoissa ja elinkaarivastuu-urakoissa pääurakoitsijan työmaanhallinnassa korostuvat myös käytettävien aliurakoitsijoiden ohjaus ja hallinta. Automaation avulla voidaan tulevaisuudessa edelleen hoitaa, tehostaa ja helpottaa mm. aliurakoitsijan työskentelyn toteutuman seurantaa ja tallennusta, työohjeiden välitystä aliurakoitsijan järjestelmiin, hallita aliurakoitsijan rajoitettuja käyttöoikeuksia työmaan tietojärjestelmässä, ohjata aliurakoitsijan työnsuunnittelua sekä välittää tarvittavia koneohjausmalleja pääurakoitsijalta aliurakoitsijalle.

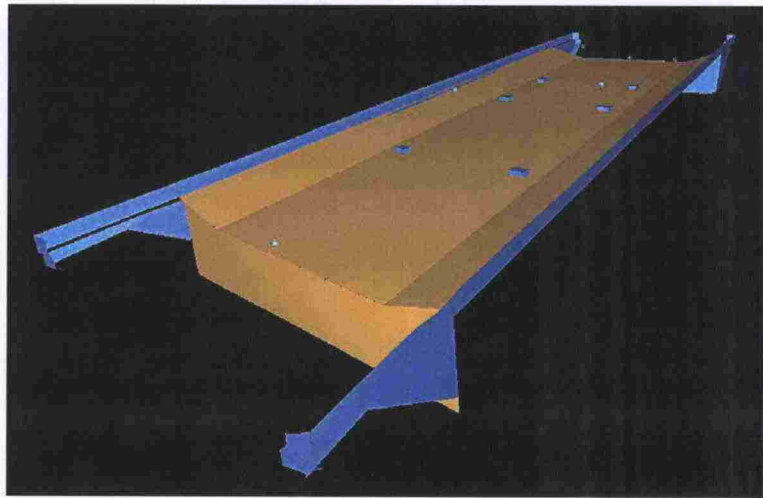
4.7 Laadun varmistus

Työnaikaisen laadunvarmistuksen tavoitteena on ennaltaehkäistä virheiden syntyminen. Työmaatoiminnot olisi järjestettävä siten, että koko ajan kyetään varmistumaan tavoiteltavan laadun saavuttaminen. Erikoisen tärkeää tämä on välittömästi tuotantoa ohjaavissa tehtävissä. Paikalleenmittausten tarkkuutta tulisi seurata ja kontrolloida jatkuvasti. Jos työkoneissa käytetään automatisoituja ohjausjärjestelmiä, tulisi myös niiden ohjaustarkkuutta kyetä seuraamaan ja kontrolloimaan. Tarkkuuden ja laadun seurantaan tarvitaan referenssit ja

tehtävään soveltuvat vertailumittausmenetelmät. Periaatteessa tuotantoa ohjaavissa tehtävissä käytettävät toleranssit tulisivat olla tiukemmat kuin valmiiden tuotteiden tarkastusmittauksissa vertailukohtana käytettävät toleranssit.



Kuva 41. Teräsbetonisillan muotin laserkeilaus käynnissä (Skanska Tekra Oy, Joroinen-Varkaus).

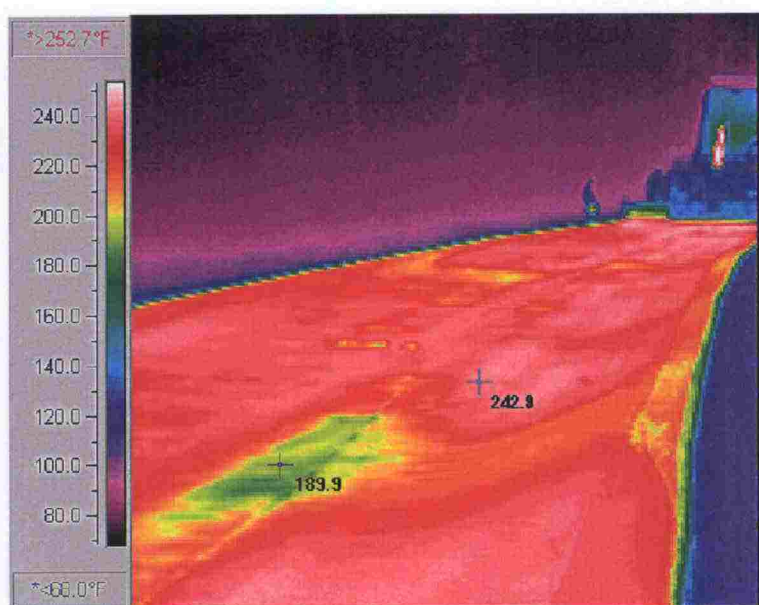


Kuva 42. Teräsbetonisillan muotin laserkeilauksella tuotetusta 3D-pistepilvestä on mallinnettu muotin toteutumamalli (Skanska Tekra Oy, Joroinen-Varkaus).

Mittausteknisesti tarkasteltuna laadunvarmistukseen sisättyy kaksi eri tyypistä menetelmää: *a priori*- ja *a posteriori*-tyyppiset mittausalgoritmit. *a priori*-tyyppisiä algoritmeja käytetään mittaustekniikassa yleisesti satunnaisten mittausvirheiden kasautumisen etukäteiseen arviointiin. Kun tunnetaan eksakti matemaattinen ratkaisu johdannaissuurelle sekä perushavaintosuureiden satunnaisten

virheiden suuruus, voidaan johdannaissuureiden satunnaisten virheiden suuruus arvioida stokastisella matematiikalla. Tällaiset mallit antavat mittaustilanteeseen suuruusluokan parhaimmasta saavutettavissa olevasta tarkkuudesta. Esimerkiksi koneohjauksessa käytettävälle robottitakymetrille voidaan johtaa kinemaattisessa mittaustilanteessa ilmentyvien satunnaisten mittausrvirheiden stokastiset mallit. Teoriassa mallia voidaan laajentaa työkoneiden teränohjaukseen saakka.

A posteriori –tyyppiset algoritmit perustuvat tasoituslaskun ideaan. Tasoituslaskussa perushavaintosuureita pyritään mittaamaan enemmän kuin johdannaissuureiden laskemiseksi välttämättä tarvittaisiin. Tällöin mittaushavainnoissa ilmentyneet satunnaisten virheiden aiheuttamat ristiriitaisuudet tasoitetaan matemaattisesti siten, että johdannaissuureille saadaan johdettua tarkemmat lukuarvot. Toisena etuna on myös, että mittaushetkellä ilmenneiden todellisten satunnaisvirheiden suuruutta voidaan samalla reaaliaikaisesti arvioida ja kontrolloida. Tienrakentamisessa esiintyvissä normaaleissa maanmittaustehtävissä tasoituslaskennassa on käytetty jo pitkään pienimmän neliösumman menetelmää. Teoriassa tasoituslaskua on voisi olla mahdollista soveltaa paikannusjärjestelmän lisäksi myös työkoneiden teränohjausjärjestelmissä.



Kuva 43. Yhdysvalloissa kokeillaan lämpökameroiden käyttämistä asfaltinlevityksen laadun varmistuksessa.

5 AUTOMAATIO LAADUN TARKASTUKSESSA

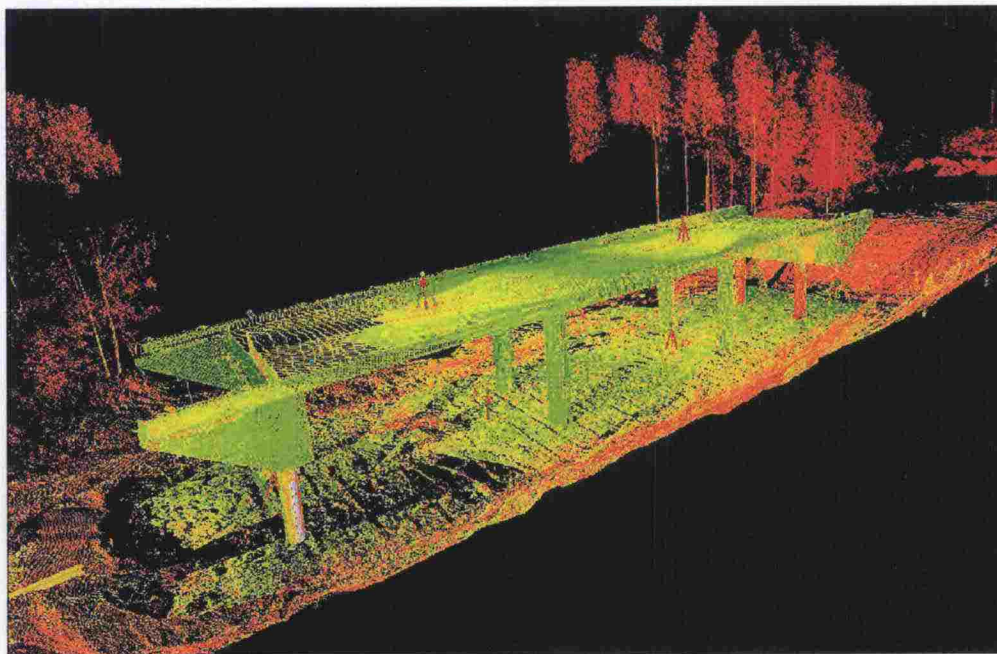
Automaation kokonaistoimintaprosessissa työn toteutuksen jälkeen on todettava toteutuman eli tuotteiden laatutason riittävyys suhteessa niille asetettuihin laatuvaatimuksiin eli toleransseihin. Laaduntarkastus tehdään myös työn luovutusta varten. Laadun tarkastukseen sisältyy valmiiden rakenne- ja tuoteosien mittaaminen, varusteiden ja niiden toimivuuden toteaminen, vertailut suunnitelmamalleihin, vertaukset toleransseihin, tulosten tallennus työmaan tietokantaan sekä tarvittavilta osin vienti tietorekistereihin. Geometriaa tarkastavat mittaukset voidaan tehdä esimerkiksi takymetrillä, RTK/GPS-järjestelmällä, laserkeilaimella, työkoneeseen integroitu mittausjärjestelmällä tai tarkoitusta varten suunnitellulla mittausautolla. Rakenteiden muita ominaisuustietoja mitataan soveltuvilla muilla mittausmenetelmillä kuten kantavuutta pudotuspainolaitteella, tiiveyttä troxler- ja dor-menetelmillä, kiihtyvyyssantureilla tai tiivistyskoneen ylistyskertojen määrää laskemalla sekä taipumia esimerkiksi venymäliuskoilla. Myös video- ja lämpökameroja sekä tien pinnan 3D-profiilin mittausjärjestelmiä voidaan hyödyntää laadun tarkastuksessa. GPS-paikannuksen ja langattoman tiedonsiirron hyödyntäminen tienrakentamisen laadun tarkastuksessa on tulossa käyttöön.



Kuva 44. Tien pinnan 3D-profiilin mittausjärjestelmiä käytetään päällystystyön laadun tarkastuksessa. Mittauksen tuloksena saadaan mm. tien pituus- ja poikkikaltevuus sekä tasaisuustietoa (www.greenwood.dk).

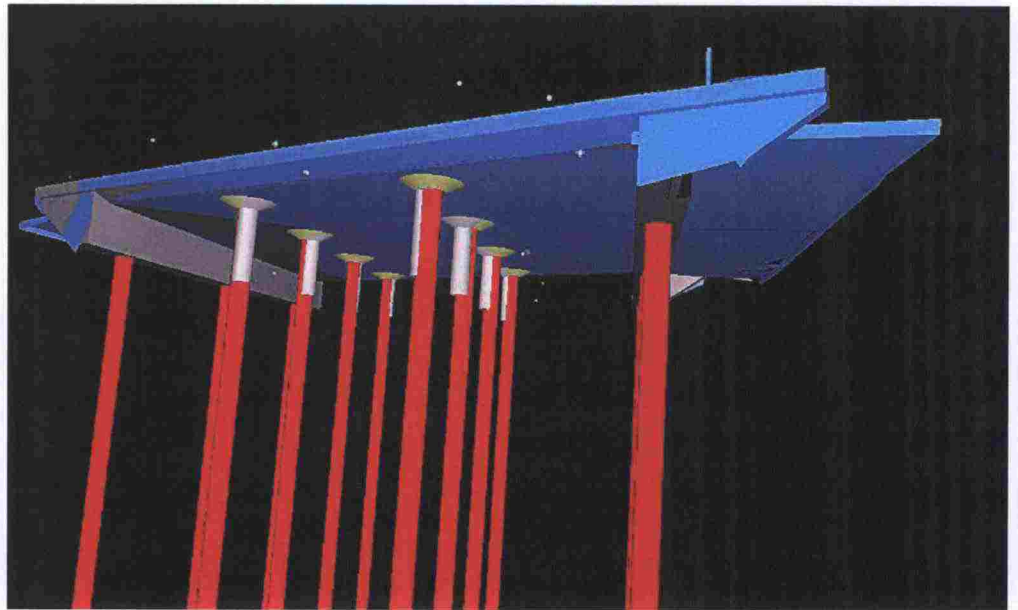
Esimerkkisillan geometrian tarkastus laserkeilaamalla vei kokeissa työaikaa noin puoli työpäivää. Laserskannaustuloksia verrattiin siltasuunnittelijan kehittämään sillan solidimalliin. Sillasta tehty 14 eri keilausta yhdistettiin tähyksien koordinaattien avulla yhdeksi 3D-pistepilveksi. Analyysissä yhdistäminen vei käytetyn Cyclone-ohjelmiston avulla aikaa noin 50 minuuttia. Jokaisessa tehdysssä keilauksessa mitattiin myös tähyksen keskipisteet tarkasti. Kun keskipisteiden koordinaatit siltatyömaan koordinaatistossa tunnettiin samalla tehtyjen takymetrimittausten perusteella, voitiin kaikki pistepilvet muuntaa suoraan siltakoordinaatistoon. Tällöin kaikkia sillan 3D-sijainti-, mita- ja muotopoikkeamia voitiin tarkastella suoraan siltasuunnitelmaan verrattuna. Siten jokaisessa mitatun pisteen poikkeamassa "näkyi" mittapoikkeaman lisäksi myös sijaintipoikkeama. Voitai-

siin myös käyttää termiä "kokonaispoikkeama". Jos haluttaisiin tarkastella pelkästään ulkomittoja ja muotoja, tulisi sijaintipoikkeamat ensin vähentää kokonaispoikkeamista.



Kuva 45. Teräsbetonisillan laserkeilauksen tuottama 3D-pistepilvi (Skanska Tekra Oy, Joroinen-Varkaus).

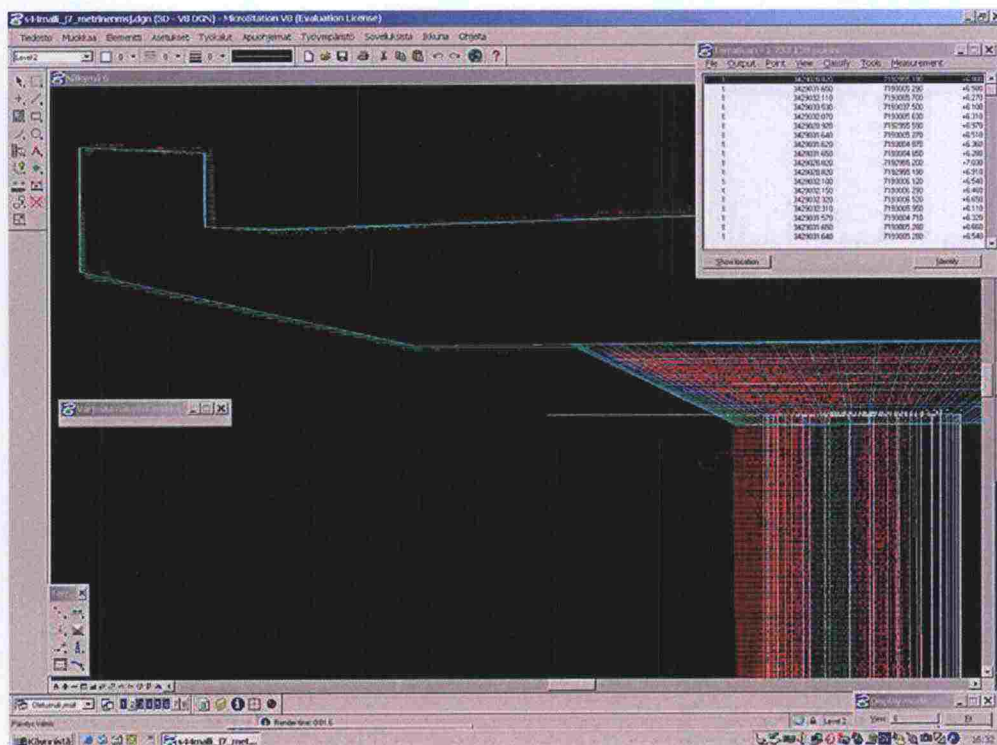
Yksittäisten pisteiden kokonaispoikkeamia suunnitelmamalliin nähden voitiin tarkastella Virtual Surveyor –toiminnolla. Kannesta poimittujen pisteiden pystysuuntaiset kokonaispoikkeamat olivat pääsääntöisesti alle 1 cm. Suurin havaittu, mahdollisesti yksittäisen kiven aiheuttama, poikkeama oli 33 mm. Reunapalkin yläpinnan sivusuuntaiset mittapoikkeamat olivat maksimissaan 2,0...2,6 cm. Reunapalkin poikkeamien vertailu oli mallin avoimuudesta johtuen Cyclone-ohjelmalla ongelmallista. Kannen alapinnasta mitatut pystysuuntaiset kokonaispoikkeamat olivat alle 5 mm eli todella pieniä. Paalujen yläpään keskipisteiden kokonaispoikkeamat vaihtelivat 15...35 cm. Aiemmin takymetrillä suoritettujen tarkemittaukset antoivat kannen poikkeamien vaihteluväliksi -32 mm...+10 mm keskiarvon ollessa -9 mm. Cyclon-ohjelmistolla pistepilvestä voitiin poimia lähes vastaavansuuruinen vaihteluväli -38 mm...+14 mm keskiarvon ollessa sama -9 mm. Reunapalkin muotopoikkeaman vaihteluväli oli takymetritulosten mukaan -6 mm...+14 mm, missä keskiarvo oli -4 mm.



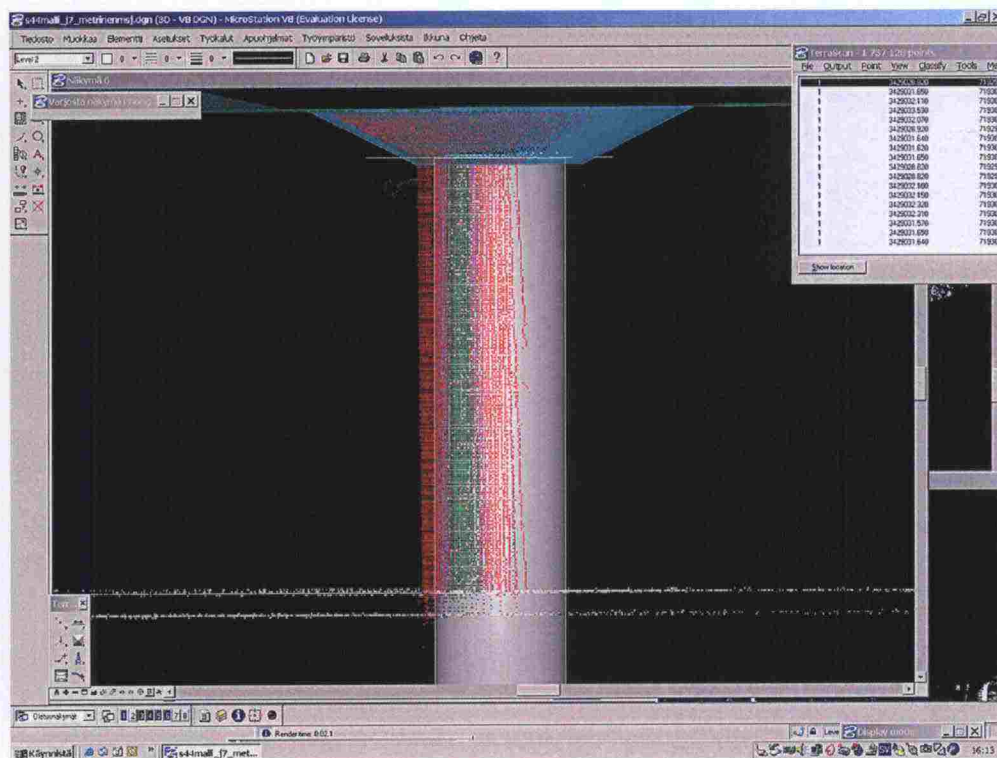
Kuva 46. Ns. globaalia tarkkuustarkastelua: S44 – mitattuun pistepilveen mallinnettu silta (sininen ja vaalean harmaa) sekä suunnitelmamalli (tumman harmaa ja punainen). Pistepilvi on poistettu tästä kuvasta.

Poikkeamien tarkastelu rajoittui Cyclone-ohjelmistolla yksittäisten pisteiden tarkasteluun kerrallaan. Kokonaisvaltaista esimerkiksi väreihin sidottua poikkeamatarkastelua ei voitu tehdä. Cyclone-mallinnus mittausteknisesti tarkasteltuna antaa kuvaa ns. globaalista sijainti- ja muotopoikkeamista (esimerkiksi tason sijaintipoikkeama tai ympyrän säteen poikkeama). Sen lisäksi olisi voitava tarkasteltava myös ns. lokaaleja poikkeamia eli globaalin muodon sisälle jääviä vaihteluja. Globaalit ja lokaalit poikkeamat yhdessä antavat tarkkuudesta paremman kuvan.

Terrasolid Oy kehitti projektissa 3D-mittaustulosten käsittelyyn uusia työkaluja. Alla olevat kuvat havainnollistavat ensimmäisiä testaustuloksia. Sovellukset on testattu MicroStation -versiossa 8.10. Oleellista uutta näissä työkaluissa oli, että havainnoksi saatua pistepilveä pystyttiin nyt suoraan vertaamaan 3D-suunnitelmamalliin. Mallit luetaan samaan työtiedostoon päällekkäin, jolloin kolmiulotteisia eroja voidaan tarkastella sillan joka puolelta. Pistepilvestä ja suunnitelmamallista pystytään myös ottamaan havainnollisia poikkileikkauksia halutuista kohdista. Mittauksen suorittamistavasta johtuen laskettuihin poikkeamiin sisältyy mitta- ja muotopoikkeamien lisäksi myös sillan sijaintipoikkeamia. Jatkossa tehtäväksi jää siten erityyppisten poikkeamien erittely sekä SYL-toleransseihin vertauksen kytkemisen työkaluihin mukaan.



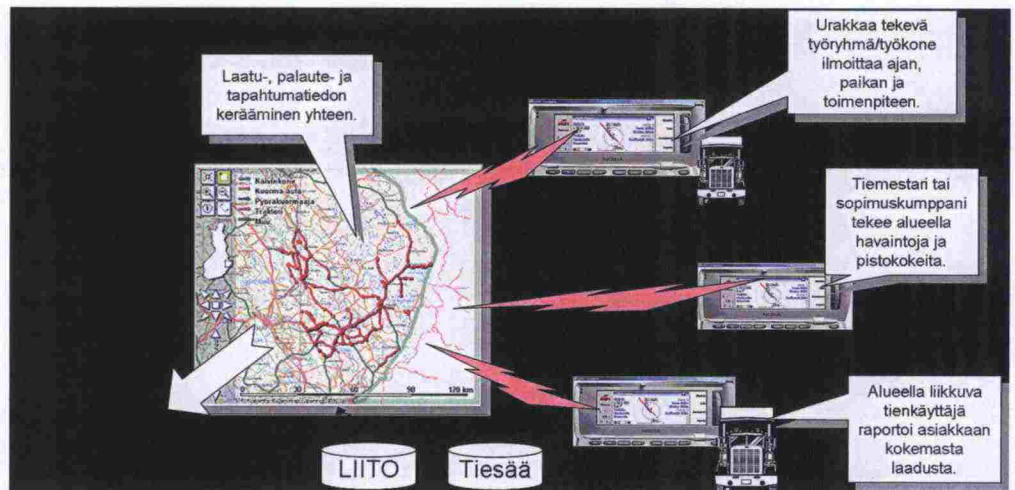
Kuva 47. Laadun tarkastus - sillan tarkastusmittauksen tuloste. Silta tarkistettiin laserkeilaimella. Saatua pistepilveä verrattiin siltasuunnittelijan alkuperäiseen 3D-malliin. Poikkeamien suuruus on havainnollistettu väreillä.



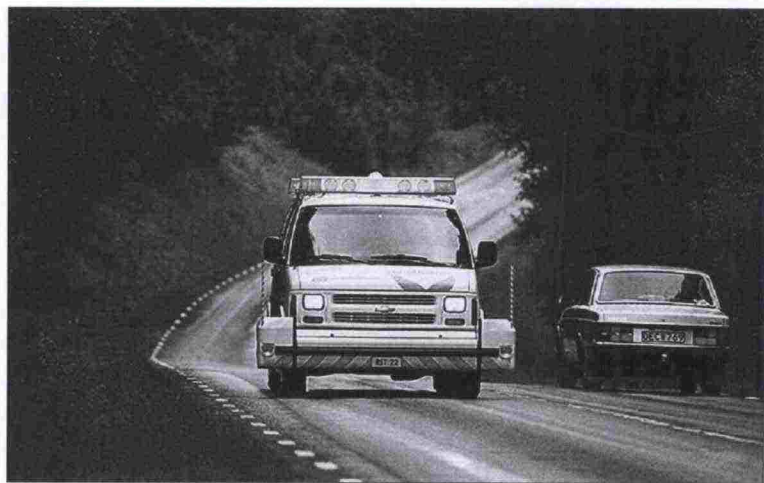
Kuva 48. Sillan pilarin sijainnissa havaittiin sijaintipoikkeama, joka havainnollistuu kuvassa punaisena pistepilvenä pilarin vasemmassa reunassa.

6 AUTOMAATIO HOIDOSSA JA YLLÄPIDOSSA

Rakennustöiden päätyttyä alkaa tieväylän liikennekäyttö, ylläpito ja hoito. Pidempiaikaisissa toimeksiantoissa myös käytön, ylläpidon ja hoidon tehtävät saattavat kuulua samalle urakoitsijalle. Oleellista on liikenteen palvelutason ja liikenneturvallisuuden säilyttäminen. Tieväylän kuntoa ja liikenteenpalvelukykyä on seurattava jatkuvasti niin, että mahdolliset ongelmat havaitaan mahdollisimman varhaisessa vaiheessa. Käytön, ylläpidon ja hoidon aikaina joudutaan siis tekemään mittauksia, jotka voitaisiin luokitella esimerkiksi geometrisiin mittauksiin, palvelusomittauksiin sekä tienkäyttäjiltä saatuun palautetietoon. Kerätty mitaustieto voidaan viedä edelleen tieväylästä vastaavan esimerkiksi Tiehallinnon tie-, silta- ja kuntotietorekistereihin. Liikenteen palvelusomittauksissa mitataan tien pituus- ja poikkisuuntaista tasaisuutta (IRI, RMS), uria ja sivukaltevuutta sekä pinnan karkeutta.



Kuva 49. Visio hoidon ja ylläpidon aikaisiin mittauksiin (Tiehallinto).



Kuva 50. Tieväylien palvelusomittauksia PTM-autolla (Ramboll). Tietoja kerätään tietorekisteriin myös tulevia rakenteen parantamisprojekteja varten.

7 ARVIOINTI JA YHTEENVETO

Automaatiolla on hämmäntävän suuret vaikutukset ja mahdollisuudet tienrakentamisen toimintaprosesseissa. Perinteisesti hyvin vanhanaikaiseksi ja kehittymättömäksi leimattu ala on alkanut soveltaa kaikkein uusimpia teknologiakehityksen tuloksia. Mittakaavassa ehkä suurin mullistus on tarkan satelliittipaikannusjärjestelmän integrointi tienrakentamisen prosesseihin: avaruudessa kiitävät satelliitit paikantavat ja ohjaavat eri puolilla maapalloa tienrakennusprojekteissa tekemää tuotantotyötä. Laserkeilaus ilmasta ja maasta tehtynä uudistaa merkittävästi kolmiulotteisen muotogeometrian mittaamista ja hallintaa. Maastomallin tuottamiseen kuluu enää murto-osa siitä ajasta, joka siihen aiemmin kului fotogrammetrisista kuvista tuottamiseen. Siltojen sekä sijainnit, mitat että muodot saadaan kokonaisvaltaisesti mitattua ja talteen tarkkuudella ja tiheydellä, joka aiemmilla mittaustekniikoilla takymetrit mukaanluettuna ei teknistaloudellisesti ollut mahdollista. Laserkeilaus on integroitumassa myös ajoneuvoihin, joilla pitkienkin tieväylien skannaus on lähitulevaisuudessa arkipäivää. Tuotesuunnittelu on muuttunut tai muuttumassa 3D-mallintamiseksi – perinteinen kaksikulotteinen piirtäminen tietokoneavusteisestikin on väistymässä. Tuotemallinnus kehittyy edelleen ja geometriatieto täydentyy tulevaisuudessa yhä enemmän kaikenlaisella ominaisuustietona.

Automaatio on tullut voimakkaasti myös työkoneiden teränohjaukseen. Tarkimmin on tutkittu tiehöylän 3D-ohjausjärjestelmää ja mitattu automaation vaikutuksia rakennustöiden kulkuun: rakennekerrosten tasaustöiden työmenekki on puoliintunut eikä saavutettu ohjaustarkkuus $\pm 1\text{ cm}$ ole jättänyt rakentajille ja tilaajille toivomisen varaa. Oleellista on myös havaittu tekniikan innostava vaikutus avaintyötekijöihin: suunnittelija on huomannut ohjaavansa suunnitelmamallillaan suoraan työkoneita ja kuljettajia saaneensa käytettäväksi "älyhöylän", jolla arkiseen työntekoon on tullut uusia erittäin mielenkiintoisia ja hyödyllisiä piirteitä ja apuvälineitä. Kuljettajan avaintehtävän arvostus on noussut myös muiden silmissä. Erittäin oleellista on myös suunnittelun ja rakentamisen toimiva ja suora tiedonsiirtolinkki.

Koko maailmassa maarakennuskoneiden ohjausjärjestelmien markkinat ovat voimakkaassa kasvussa. Lähes jokaiseen eri tyyppiseen yleisesti käytössä olevaan työmenetelmään on jo saatavissa eri tasoisia automatisoituja koneohjausjärjestelmiä. Sovellus- ja hyödyntämismahdollisuuksia avautunee myös koko ajan lisää. Työmaakohtaiset projektitietopankit, langaton reaaliaikainen liikenne liikkuvien toimijoiden kesken, vielä älykkäämmät robotisoidut toiminnut, internettiin kytkeytyvät tietojärjestelmät avaavat mahdollisuuksia, joita kukaan ei olisi voinut kuvitella vielä runsas kymmenen vuotta sitten. Automaatioteknologia voidaan saatujen kokemusten perusteella arvioida olevan täynnä erilaisia mahdollisuuksia tienrakentamiseen. Tienrakentamiselle automaatiotekniikka merkitsee uutta nousua informaatiotekniikan aikakaudelle.

8 KIRJALLISUUSVIITTEET

Älykäs tietyömaa –osaraportit:

Heikkilä, R. & Jaakkola, M. (2003) Tienrakennuskoneiden automaattisen ohjauksen tarpeet ja mahdollisuudet. Automaatio tienrakentamisessa. Osaraportti I, Tienpidon digitaalisen toimintaprosessin kehittäminen ja rakentamisen automatisointi. Oulu, Rakentamisteknologian tutkimusryhmä, tutkimusraportti, 56 s + liitteet.

Heikkilä, R. & Jaakkola, M. (2004) 3D-mittaustekniikat tienrakennusautomaatiossa. Osaraportti II, Tienpidon digitaalisen toimintaprosessin kehittäminen ja rakentamisen automatisointi. Oulu, Rakentamisteknologian tutkimusryhmä, tutkimusraportti, 60 s. + liitteet.

Jaakkola, M. & Heikkilä, R. & (2003) Tutkimus 3D-suunnitteluprosessin kehittämistarpeista. Osaraportti III, Tienpidon digitaalisen toimintaprosessin kehittäminen ja rakentamisen automatisointi. Oulu, Rakentamisteknologian tutkimusryhmä, tutkimusraportti, 68 s.

Heikkilä, R. & Jaakkola, M. (2004) Maarakennusautomaation ja -robotiikan kansainväliset kehittämisnäkymät. Osaraportti IV, Tienpidon digitaalisen toimintaprosessin kehittäminen ja rakentamisen automatisointi. Oulu, Rakentamisteknologian tutkimusryhmä, tutkimusraportti, 49 s. + liitteet.

Heikkilä, R. & Jaakkola, M. (2004) Tienrakennusautomaation työmaakokeet. Osaraportti V, Tienpidon digitaalisen toimintaprosessin kehittäminen ja rakentamisen automatisointi. Oulu, Rakentamisteknologian tutkimusryhmä, tutkimusraportti, 37 s. + liitteet.

Heikkilä, R. & Jaakkola, M. (2004) Intelligent Road Construction Site – English Articles published in ISARC (International Symposium on Automation and Robotics in Construction) Symposiumes 2002-2004. Part report VI including 11 different papers. Oulu, Research of Construction Technology.

Kilpeläinen, P. & Nevala, K. & Tukeva, P. & Rannanjärvi, L. & Näyhä, T. & Parkkila, T. (2004) Älykäs tietyömaa. Tienrakennuskoneiden modulaarinen ohjaus. Espoo 2004. VTT Tiedotteita 2255. 116 s.

Muut lähteet:

Heikkilä, R. & Jaakkola, M. (2002) The Efficiency of a 3-D Blade Control System in the Construction of Structure Layers by Road Grader – Automated Design-Build of Road Construction in Finland. ISARC'2002, 19th International Symposium on Automation and Robotics in Construction, 23-25 September 2002. Washington, DC, the United States of America, pp. 475-480.

Heikkilä, R. & Jaakkola, M. (2003) Intelligent Road Construction Site – Development of Automation into total working Process of Finnish Road Construction. ISARC'2003, 20th International Symposium on Automation and Robotics in Construction, 21-24 September 2003. Eindhoven, the Netherlands, pp. 265-269.

Heikkilä, R. & Jaakkola, M. (2003) Automatic Control for Road Construction Machinery – Feasibility and Requirements. ISARC'2003, 20th International Symposium on Automation and Robotics in Construction, 21-24 September 2003. Eindhoven, the Netherlands, pp. 103-110.

Heikkilä, R. & Jaakkola, M. & Pulkkinen, M. (2003) Connecting 3-D Concrete Bridge Design to 3-D Site Measurements. ISARC'2003, 20th International Symposium on Automation and Robotics in Construction, 21-24 September 2003. Eindhoven, the Netherlands, pp. 259-264.

Heikkilä, R. & Jaakkola, M. (2004) Towards Model based Automation - Different types of 3-D Machine Control Models for the Automatic Control of Road Construction Machinery. ISARC'2004, 21st International Symposium on Automation and Robotics in Construction, 21-25 September 2004. Jeju, Korea, pp. 53-58.

Heikkilä, R. & Jaakkola, M. & Pulkkinen, P. (2004) Modelling Measurements and Measuring Models – Problems and Solutions of 3-D Geometrical Control in Concrete Bridge Engineering. ISARC'2004, 21st International Symposium on Automation and Robotics in Construction, 21-25 September 2004. Jeju, Korea, pp. 81-84.

Heikkilä, R. & Jaakkola, M. (2004) 3-D Real-Time Accuracy Control of Automated Road Construction Machines. ISARC'2004, 21st International Symposium on Automation and Robotics in Construction, 21-25 September 2004. Jeju, Korea, pp. 49-52.

Heikkilä, R. & Jaakkola, M., & Pulkkinen, P. & Karjalainen, A. & Haapa-aho, E. & Jokinen, M. (2004) Siltojen 3D-suunnittelu- ja -mittausjärjestelmän kehittäminen (Älykäs silta). Helsinki, Tiehallinto, Tiehallinnon selvityksiä 36/2004. Tutkimus- ja tuotekehitysprojektin väliraportti. Helsinki, Oy Edita Ab, ISSN 1457-9871, ISBN 951-803-303-x, TIEH 3200886. 61 s.

Jaakkola, M. & Heikkilä, R. (2004) Kadun suunnittelu- ja rakentamisprosessin kehittäminen – helikopterilaserkeilauksen soveltuvuus kadunsuunnitteluprosessin lähtötietojen mittauksiin. Automaatio tienrakentamisessa. Oulu, Oulun yliopisto, Rakentamisteknologian tutkimusryhmä. Älykäs tietyömaa –t&k-kokonaisuuteen sisältyneen tutkimus- ja tuotekehitysprojektin väliraportti. Julkinen. 23 s.

Heikkilä, R. & Jaakkola, M. & Saarenketo, T. & Malaguti, F. (2004) Modelling Information Flows for Automated Road Rehabilitation Process. ISARC'2004, 21st International Symposium on Automation and Robotics in Construction, 21-25 September 2004. Jeju, Korea, pp. 85-93.

Jaakkola, M. & Heikkilä, R. & Soininen, A. (2003) Applicability of Laser Scanning to the Measurement of a 3-D Terrain Model for Street Design. ISARC'2003, 20th International Symposium on Automation and Robotics in Construction, 21-24 September 2003. Eindhoven, the Netherlands, pp. 271-275.

Jaakkola, M. & Heikkilä, R. (2000) Liikkuvan työkonteen ohjaus tienrakentamisessa. Tiehöylän ja murskeenlevittimen CAD/CAM-järjestelmät. Tienrakennusautomaatio. Tutkimus- ja tuotekehitysprojektin loppuraportti. Luottamuksellinen. Oulu, Oulun yliopisto, Rakentamistalouden laboratorio. Kansio sisältäen yhteenvedonraportin 13 s. + 10 eri liiteraporttia ja yhden videokasetin: 1) Tiesuunnitelmien sisäänluku numeeriseen koneohjausjärjestelmään, 2) Geodimeter ATS-MC –takymetrin testaus, 3) Kinemaattisen paikannusmenetelmän kalibrointimenetelmä, Geodimeter ATS-MC –takymetrin kalibrointitulokset, 4) RTK-GPS –kinemaattisen paikannusjärjestelmän kalibrointi. Geoditech Oy:n RTK-GPS –satelliittimittausjärjestelmän paikannustarkkuuden määrittäytulokset, 5) Laserohjattu murskeenlevitin – tarkkuus ja kapasiteettitutkimus, 6) Tiehöylän työstötarkkuuden muodostuminen ja 3D-paikannus automaattisessa teränohjauksessa, 7) Tiehöylän automatisoitu teränohjaus – menetelmätutkimus, 8) Tiehöylän automaattisen teränohjausjärjestelmän testaus Kemi-Tornio –moottoritietyömaalla, 9) Videoanimaatio automaattisesta tiehöylän ohjausjärjestelmästä, 10) Murskeenlevittimen 3D-ohjausjärjestelmän testaus Espoon Soukan tietyömaalla.

Jaakkola, M. & Heikkilä, R. (2001) Tielaitoksen tiehöyliä automatisointi – kehittämisvaihe I. Tuotekehitysprojektin loppuraportti. Oulu, Oulun yliopisto, Teknillinen tiedekunta, Rakentamisteknologian tutkimusryhmä. Kansio, sisältäen 4 liitettä (tiehöylän automaattinen teränohjausjärjestelmä, työmaamittausten pöytäkirjat, kuljettajien käyttöohje ATS-robotitakymetrin käyttöön ja mittaustyömenekkilaskelma), liiteraportin "Tiehöylän varustelu" sisältäen yksityiskohtaiset tekniset tiedot koneohjausjärjestelmästä sekä videon cd-levynä, sivuja 25+41+39+78, yht. 183.

Makkonen, T. & Nevala, K. & Heikkilä, R. (2004) Automation of an Excavator based on a 3-D CAD Model and GPS Measurement. ISARC'2004, 21st International Symposium on Automation and Robotics in Construction, 21-25 September 2004. Jeju, Korea, pp. 268-273.

Kilpeläinen, P. & Nevala, K. & Heikkilä, R. (2004) Development of a Control System for Road Construction Automation Applications. ISARC'2004, 21st International Symposium on Automation and Robotics in Construction, 21-25 September 2004. Jeju, Korea, pp. 65-70.

<http://www.iredes.org/>

ISSN 1457-9871
ISBN 951-803-418-4
TIEH 3200915